



This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

- + *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
- + *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
- + *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
- + *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at <http://books.google.com/>



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

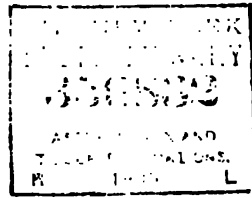
Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

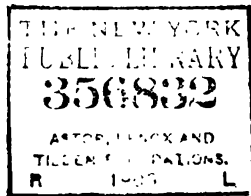
- + *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.
- + *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.
- + *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.
- + *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter <http://books.google.com> durchsuchen.



3-VGC



3 VGC

Handbuch

der

Elektrotechnik

bearbeitet von

Professor Dr. **H. Ebert**, München. — Ingenieur **H. Eisler**, Wien. — Oberingenieur **V. Engelhardt**, Charlottenburg. — Kgl. Bayr. Obermaschineninspektor Dr. **B. Gleichmann**, München. — Professor Dr. **C. Heinke**, München. — Direktor **R. O. Heinrich**, Berlin. — Oberingenieur Dr. ing. **K. Hohage**, Berlin. — Postrat **O. Jentsch**, Erfurt. — Professor Dr. **J. Kollert**, Chemnitz. — Direktor **O. Krell**, Berlin. — Professor Dr. **F. Niethammer**, Brünn. — Geheimer Rechnungsrat **J. Noebels**, Vorsteher des Telegraphenbaubureaus des Reichs-Postamts, Berlin. — Regierungsbaumeister **Pforr**, Berlin. — Professor **Karl Pichelmayer**, Wien. — Oberingenieur **H. Pohl**, Berlin. — Postrat **A. Schluckebier**, Kiel. — Oberingenieur **E. Schulz**, Saalfeld. — Oberingenieur **H. Schwerin**, Charlottenburg. — Direktor Dr. **E. Sieg**, Köln. — Ingenieur **B. Soschinski**, Berlin. — Direktor **K. Wilkens**, Berlin. — Physiker **B. Ziegenberg**, Berlin

herausgegeben von

Dr. C. Heinke

Professor der Elektrotechnik an der Technischen Hochschule in München.

Sechster Band:

**Die Leitungen, Schalt- und Sicherheitsapparate
für
elektrische Starkstromanlagen**

von

H. Pohl und B. Soschinski.

Zweite und dritte Abteilung.

Leipzig

Verlag von **S. Hirzel**

1906.

Die Leitungen, Schalt- und Sicherheitsapparate

für

elektrische Starkstromanlagen

von

H. Pohl und B. Soschinski

Oberingenieur.

Ingenieur.

Zweite Abteilung.

Schaltanlagen, Montage der Leitungen und Kabel.

Bearbeitet von **H. Pohl.**

Mit 366 Abbildungen und 6 Tafeln.

Dritte Abteilung.

Berechnung von Leitungsnetzen.

Bearbeitet von **B. Soschinski.**

Mit 159 Abbildungen.

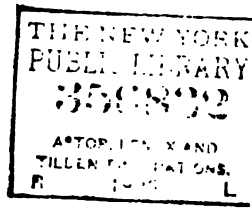
NEW YORK
PUBLIC
LIBRARY

Leipzig

Verlag von S. Hirzel

1906.

2

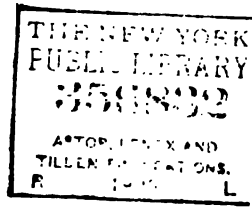


~~~~~  
Das Recht der Übersetzung ist vorbehalten.  
~~~~~

ROY VAN
DIJK
VRAAG

Zweite Abteilung.

Schaltanlagen. — Leitungsverbindungen, Kabelgarnituren. — Verlegung der Kabel. — Freileitungen. — Verlegung der Leitungen in Innenräumen. — Persönliche Sicherheit und Feuersicherheit in elektrischen Anlagen.



~~~~~  
Das Recht der Übersetzung ist vorbehalten.  
~~~~~

ROY W. VON
ALLEN
VON
VON

Druck von Fischer & Wittig in Leipzig.

Zweite Abteilung.

Schaltanlagen. — Leitungsverbindungen, Kabelgarnituren. — Verlegung der Kabel. — Freileitungen. — Verlegung der Leitungen in Innenräumen. — Persönliche Sicherheit und Feuersicherheit in elektrischen Anlagen.

PHOTO
LIBRARY

ROY VAN
DUN
VRAAG

Vorwort.

Der vorliegende zweite Teil des sechsten Bandes des Handbuches der Elektrotechnik umfasst das ausserordentlich weit umfassende Gebiet der Verlegung der Leitungen. Hierher gehören nicht allein die zur Stromverteilung in grossen Netzen gehörenden Kabel, sondern auch die bis in die weitesten Verzweigungen reichenden Installationsleitungen, deren Konstruktion und Herstellung bereits in der ersten Hälfte dieses Bandes besprochen wurde. Bei der Besprechung der Montage der Kabel war es erforderlich, auch auf die verschiedenen Kabelgarniturteile näher einzugehen und im ferneren auch die verschiedenen Kabelschutzhüllen einer Betrachtung zu unterziehen. — Im Kapitel „Freileitungen“ ist versucht, alles zusammenzustellen, was zu den immer mehr Bedeutung gewinnenden Fernleitungen gehört. Durch grössere Entfernungen lässt sich die heutige Technik nicht mehr von der Ausführung grösserer Kraftübertragungen zurückschrecken, und wo in den Gebirgen billige Wasserkräfte zur Verfügung stehen, da leiten dünne Drähte gewaltige Energiemengen den grösseren Industriezentren zu. Grosse Schwierigkeiten bieten hierbei die rechtlichen Verhältnisse, insbesondere Wege- und Telegraphengesetze u. s. w., ferner der Mangel ausreichender Enteignungsmöglichkeit. Es war daher auch erforderlich, hierauf etwas näher einzugehen. Der wachsenden Bedeutung der Freileitungen entsprechend haben sich Verlagsbuchhandlung und Autor entschlossen, von diesem Kapitel einen erweiterten Sonderdruck herauszugeben.

Mit der Erhöhung der Spannungen und mit dem immer weiteren Vordringen der Elektrotechnik in die weitesten Zweige unserer Industrie, demzufolge auch weitere Schichten der Bevölkerung mit elektrischen Anlagen in Berührung kommen, kann auch die Gefahr persönlicher Schädigungen grösser werden, wenn nicht durch die Art der Ausführung und durch geeignete Schutzmassregeln die persönliche Sicherheit gewährleistet wird. Aus diesem Grunde ist diesem Abschnitt besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Bei der Besprechung der Feuersicherheit elektrischer Anlagen ist besonders darauf hingewiesen, dass in feuer- und explosionsgefährlichen Räumen besondere Vorsicht walten muss. Indessen kann es dem Elektrotechniker nicht immer leicht sein, zu entscheiden, welche Räume unter diese Kategorie fallen. Es ist daher versucht, diese Frage allgemein zu beantworten, soweit es bei ihrer Schwierigkeit möglich ist.

Schliesslich erfülle ich noch die angenehme Pflicht, den verschiedenen Firmen, welche mich bei meiner Arbeit in umfassendem Masse unterstützt haben, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen, den ich auch für ihr liebenswürdiges Entgegenkommen der Verlagsbuchhandlung und ihren Beamten in gleichem Masse abstatte.

Pfingsten 1905.

H. Pohl.

Inhaltsverzeichnis.

Schaltanlagen.

Algemeines.	Seite
1. Einleitung	1
2. Anordnung der Schalttafeln	2
3. Material der Schalttafelplatten	3
4. Die Umrahmung	4
5. Anordnung der Apparate	4
6. Schalttafeln für Gleich- und Wechselstrom	5
Die Konstruktion der Schaltanlagen.	
7. Einteilung der Schaltanlagen	7
1. Kleine Schalttafeln.	
8. Kleine Schalttafeln, welche an der Wand befestigt werden	10
2. Freistehende Schalttafeln.	
9. Das Eisengerüst	10
10. Eiserner Normal-Schalttafeln der Siemens-Schuckert Werke	12
11. Schalttafeln, bei denen die Platten die ganze Fläche der Tafel einnehmen	14
12. Schalttafeln, bei denen nur die obere Hälfte mit Platten bedeckt ist	14
13. Schaltanlagen ohne Platten	14
3. Schaltsäulen, Schaltpulte, Schaltschränke.	
14. Schaltsäulen	15
15. Schaltpulte	19
16. Schaltschränke	21
4. Hochspannungs-Schaltanlagen, die auf mehrere Räume verteilt sind.	
17. Einrichtung und Beispiele	22
Die Verlegung von Leitungen an Schalttafeln.	
18. Leitungsmaterial an Schalttafeln	22
19. Anordnung der Leitungen	22
20. Leitungsverbindungen	24
21. Verlegung von Kupferschienen	28
22. Verbindungsleitungen zwischen den Apparaten	31
Pläne und Schaltungszeichnungen.	
23. Bezeichnungen auf den Plänen	31
24. Beispiele eines Planes und eines Schaltungsschemas	33

Die Leitungsverbindungen.

	Seite
25. Allgemeines über Leitungsverbindungen	37

Kabelgarnituren.

Endverschlüsse.

26. Zweck der Endverschlüsse	37
27. Kabelschuhe	38
28. Endverschlüsse für Einfachkabel	40
29. Endverschlüsse für konzentrische Kabel	41
30. Endverschlüsse für verseilte Kabel	42
Montagevorschrift für Endverschlüsse für zweifach verseilte Kabel der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	43

Verbindungsmuffen.

31. Zweck der Muffen	44
32. Klemmvorrichtungen	45
33. Konstruktion der Verbindungsmuffen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin	45
34. Verbindungsmuffen der Land- und Seekabelwerke, Köln-Nippes; Felten & Guillaume Karlswerk; Siemens Broth. London	48

Abzweig- und Kreuzmuffen.

35. Konstruktion	48
36. Abzweigmuffen von Siemens Broth	50
37. Abzweigmuffen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Land- und Seekabel- werke, Süddeutschen Kabelwerke	50
38. Abzweigmuffen mit Sicherungen	52
39. Muffenbezeichnungen	54

Kabelkästen.

40. Konstruktion	54
41. Kabelkästen von Siemens Broth.	54
42. Kabelkästen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	54
43. Kabelkästen der Süddeutschen Kabelwerke und von Felten & Guillaume	63
44. Ausschaltbare Kabelarmaturen	64

Verbindungen an Drähten.

45. Feste Verbindungen	64
46. Lösbare Verbindungen	70
47. Kabelschuhe und Klemmen für Installationsleitungen	71
48. Abzweigmuffen auf isolierender Unterlage, insbesondere für Schnurleitungen	74
49. Isolierung der Verbindungsstellen	76

Die Verlegung der Kabel und Leitungen.

50. Geschichtlicher Rückblick	77
---	----

Die Verlegung der Kabel.

51. Allgemeines	80
52. Transport der Kabel	82
53. Auslegen der Kabel	83
54. Die Anordnung der Kabel im Erdreich	84

Die Verlegung der Kabel in Gräben.

55. Der Kabelgraben	86
56. Das Verlegen	86

Die Verlegung in besondere Kanäle und die Schutzmittel gegen mechanische Verletzungen von Kabeln.

	Seite
57. Allgemeines	90
58. Anforderungen, die an einen Kabelkanal gestellt werden	90
59. Wahl des Materials	91
60. Schutz durch Abdeckung mit Ziegelsteinen	91
61. Schutz durch gemauerte Kanäle	92
62. Verlegung in Kanäle, die ausgegossen werden, Ausgussmasse	93
63. Verlegen in Thonröhren	96
64. Verlegen in Formsteine aus Thon	96
65. Verlegen in Beton und Cement	100
66. Abdeckungen aus Eisen	102

Beispiele ausgeführter Kabelverlegungen.

67. Kabelverlegung in Stuttgart, Cassel, Plauen, Dresden, Erfurt, Strassburg, Königsberg, Nürnberg	103
68. Bettungspraxis in England	104

Die Verlegung von Flussskabeln.

69. Herstellung der Kabelrinne	105
70. Die Verlegung	105

Die Montage der Grubenkabel.

71. Das Einhängen	109
72. Befestigung des eingehängten Kabels	110

Kosten für Kabelverlegungen.

73. Kosten der Erdarbeiten, Abdeckungen, Verbindungsstellen	111
---	-----

Freileitungen.

Leitungsmaste.

Hölzerne Maste.

74. Art der Hölzer, Fällungszeit	113
75. Beschaffenheit der Stangen. Lebensdauer	113

Imprägnierung der Holzmaste.

76. Imprägnierung durch natürliche Harzansammlung	114
77. Imprägnierungsarten	114
1. Imprägnierung mit Kupfervitriol	115
2. Imprägnierung mit Zinkchlorid	116
3. Imprägnierung mit karbolsäurehaltigen Teerölen	117
4. Imprägnierung mit Quecksilbersublimat, sogenannte Kyanisierung	118
5. Imprägnierung mit Zinkchlorid und karbolsäurehaltigem Teeröl (Verfahren nach Rütgers)	119
6. Imprägnierung nach dem System Hasselmann	121
78. Imprägnierung im elektrochemischen Bade	122
79. Anstrich der Maste	122
80. Untersuchung der Maste	122
81. Schutzmittel bei rohen Stangen	124
82. Schutzschäfte	124

Eisenmaste.

83. Verwendung und Konstruktion	126
---	-----

Stangen in den Tropenländern.

84. Stangen in den Tropen	130
-------------------------------------	-----

Berechnung der Leitungsmaste, Durchhang der Leitungen.

	Seite
85. Belastung der Maste und Leitungen	132
86. Durchhang	134
87. Zulässige Gestängebelastung	138
88. Dimensionierung der Maste	138

Isolatorenträger.

89. Eiserner Stützen	140
--------------------------------	-----

Tragkonstruktionen, Gestänge und Traversen.

90. Befestigung der Stützen und Traversen an Masten	141
91. Gestänge	145
92. Hölzerne Stützen und Traversen	147
93. Durchschläge hölzerner Bolzen	149
94. Befestigung der Isolatoren auf den Stützen	150
95. Lösbare Befestigungen	151

Das Leitungsmaterial für Freileitungen.

96. Isolierte Leitungen bis 250 Volt	151
97. Hochspannungsleitungen	151
98. Metallquerschnitt für Freileitungen	152
99. Leitungen aus Kupfer	152
100. Leitungen aus Aluminium	152
101. Leitungen aus Eisen	153

Die Isolatoren.

102. Geschichtliches	153
103. Isolatoren mit mehreren Mänteln	153
104. Geteilte Hochspannungsisolatoren	156
105. Glasisolatoren	156
106. Ölisolatoren	158
107. Krücken- und Rillenisolatoren	159

Das zur Herstellung von Isolatoren verwendete Porzellan und seine Fabrikation.

108. Allgemeines über die Porzellanisolatoren	160
109. Porzellan im Vergleiche zu anderen Isoliermaterialien	161
110. Eigenschaften des Porzellans	162
111. Fabrikation des Porzellans für elektrotechnische Zwecke	164

Untersuchung der Isolatoren.

112. Prüfung der Isolatoren auf ihre mechanischen Eigenschaften	166
113. Prüfung der Isolatoren auf ihre elektrischen Eigenschaften	167
114. Prüfstation der Porzellanfabrik Klosterlausnitz	168
115. Lieferungsvorschriften der Kaiserl. Deutschen Telegraphenverwaltung	170

Die Befestigung der Leitungen auf dem Isolator.

116. Bindungen	172
117. Schnell herzustellende Befestigungen ohne Bindung	175

Allgemeine Anordnung der Freileitungen.

118. Freileitungen an Strassen	175
119. Rechtliche Verhältnisse. Enteignung beim Bau von Fernleitungen	176
120. Enteignungsrecht in ausserdeutschen Ländern	179
121. Freileitungen innerhalb von Ortschaften und Grundstücken	180

Kreuzungen von Freileitungen mit Strassen und Bahnkörpern.

122. Kreuzungen mit Hilfe hoher Maste	180
123. Kreuzungen mit Hilfe von Schutznetzen	181
124. Kreuzungen mit Hilfe von Kabeln	183

Vorrichtungen, welche die Fernleitungen im Falle eines Bruches stromlos machen.

125. Abschaltung unter Vermittelung von Automaten und Kontaktinstrumenten . . .	185
126. Erdende Ösen	187
127. Gouldsche Kupplung	188
128. Kurzschlussvorrichtung	191

Sonstige Vorrichtungen, welche ein Herabfallen der Freileitungen vermeiden sollen.

129. Fangbügel	192
130. Schutznetze	192

Die Verlegung von Freileitungen.

131. Höhenmasse	193
132. Mastabstände	194

Grosse Spannweiten in Freileitungen.

133. Verschiedene Arten der Überspannung	195
134. Beschreibung zweier Überspannungen von grosser Spannweite.	196
135. Entfernung der Leitungen unter sich	199

Gestänge auf der Strecke.

136. Gestängeverstärkungen	199
137. Verankerungen und Streben	200
138. Bezeichnung der Maste	201
139. Einsetzen der Maste	202
140. Blitzschutz für Freileitungen	202
141. Anbringung von Apparaten in Freileitungen	204

Freileitungsmaterial der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

142. Allgemeines	204
143. Anschluss- und Abzweigstellen	206
144. Sammelringe	208

Freileitungsmaterial der Siemens-Schuckert Werke.

145. Material für Verteilungsmaste	209
146. Gestänge	212

Telephonstörungen und Schutz gegen dieselben.

147. Einwirkungen durch elektromagnetische Induktion	215
148. Einwirkungen durch elektrostatische Induktion	215
149. Kreuzungssysteme	216
150. An die Telephonanlage zu stellende Forderungen	218
151. Sicherheit gegen den Übertritt von Hochspannung in Schwachstromkreise	218
152. Ministerielle Verfügungen	219

Verlegung der Leitungen in Innenräumen.**Allgemeines.**

153. An eine Installation zu stellende Anforderungen	225
154. Kreuzungen von Leitungen	226
155. Werkzeuge	227
156. Maurerarbeiten, Dübel etc.	230

Wand- und Deckendurchführungen.

157. Durchführungsarten	239
158. Durchführung durch Holzwände	239
159. Wanddurchführungen der Siemens-Schuckert Werke	240
160. Durchführung für Hochspannungsleitungen	241
161. Deckendurchführungen	242
162. Gasdichte Wanddurchführungen	242

Die Verlegung der Leitungen auf Rollen, Ringen, Glocken und Klemmen.		Seite
163. Befestigung durch Krampen		243
164. Rollen für Spannungen bis 500 Volt		244
165. Rollen für Spannungen über 500 Volt		245
166. Entfernung der Befestigungsstellen		245
167. Das Festbinden der Leitungen an Rollen		246
168. Peschel-System		250
169. Isolatoren in bedeckten Räumen		252
170. Blanke Leitungen als Schleifleitungen		253
Verlegung der Leitungen in Rohre.		
171. Verlegung in Holzleisten		257
172. Allgemeines über Rohrverlegung		258
173. Anzahl und Querschnitt der in einem Rohr zulässigen Leiter		258
174. Verlegung in Kanäle		259
175. Hartgunmihrohre		260
176. Papierrohre mit und ohne Metallschutz		260
1. Isolierrohre ohne besonderen Schutz		261
2. Isolierrohre mit Messingüberzug		261
3. Isolierrohre mit Mantel aus Blei		264
4. Isolierrohre mit Stahl- oder Eisenmantel		264
177. Montage von Isolierrohren		266
178. Abzweigscheiben für die Rohrverlegung		268
Die Verlegung der Leitungen in Rohre ohne isolierende Auskleidung.		
179. Die Zweckmässigkeit unausgekleideter Rohre		270
180. Stahlschlitzrohr und andere ähnliche Systeme		271
Das Rohrsystem der Simplex-Steel Conduit Co.		286
Das Leitungssystem der Safety Concentric Wiring Co.		289
Hausanschlüsse.		
181. Anschluss an unterirdische Netze		290
182. Anschluss an oberirdische Netze		292
183. Hausanschlussicherungen		294
184. Einführung der Leitungen in die Elektrizitätswerke		297
Die Verlegung der Leitungen in speziellen Fällen.		
185. Installation in elektrischen Betriebs- und Akkumulatorenräumen		299
186. Installation in feuchten und durchtränkten Räumen und solchen mit stehenden Dünsten		300
187. Installation in feuer- und explosionsgefährlichen Betriebsstätten und Lagerräumen		305
188. Die Installation in Schaufenstern, Warenhäusern etc.		306
189. Leitungen in Theatern		307
Die Leitungen und ihre Verlegung in Bergwerken.		
190. Allgemeines		307
191. Installation in Maschinenkammern		307
Leitungen in schlagwetterfreien Gruben.		
1. Schächte und einfallende Strecken von mehr als 45° Neigung		308
192. Leitungen in Schächten, Wahl des Leitungsmaterials		308
2. Horizontale und einfallende Strecken von weniger als 45° Neigung		309
193. Leitungen in Strecken		309
Leitungen in Schlagwettergruben.		
194. Isolierte und blanke Leitungen		312
Die Verlegung von Leitungen auf Schiffen.		
195. Beginn der Leitungsverlegung		312
196. Anordnung der Leitungen		313
197. Leitungsmaterial bei Schiffsmontagen		312
198. Art der Verlegung		313

Kabelverlegung.

	Seite
199. Befestigungsmaterial	313
200. Kabelschutz	314
201. Decksdurchführungen	316
202. Kabelverlegung	316
203. Abzweigungen	316

Zusammenstellung der Installationsarten.

204. Installationstabelle	322
-------------------------------------	-----

**Persönliche Sicherheit und Feuersicherheit
in elektrischen Anlagen.**

205. Lebensgefährliche Spannung	323
206. Widerstand des Menschen	324
207. Künstliche Erhöhung der Übergangswiderstände	324
208. Höhe des schädlich wirkenden Stromes	325
209. Sekundäre Folgen eines Schlages	326
210. Schädigung des Organismus	326
211. Versuche an Tieren	326
212. Hilfeleistung bei Unfällen durch elektrische Schläge	327

Anleitung zur ersten Hilfeleistung bei Unfällen in elektrischen Betrieben.

I. Entfernung eines Verunglückten von der Leitung	327
II. Verbrennungen	328
III. Bewusstlosigkeit	328
213. Vorsichtsmassregeln	329

Sicherheitsvorschriften.

214. Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker	329
---	-----

Vorsichtsbedingungen für elektrische Licht- und Kraftanlagen.

215. Vorsichtsbedingungen der Feuerversicherungsgesellschaften	330
I. Elektrische Betriebsräume	330
II. Maschinen, Instrumente, Apparate	331
III. Leitungen	331
IV. Sicherungen	332
V. Lampen	333
VI. Änderungen	334
VII. Prüfung und Revision	334

Anweisung für das Betriebspersonal für elektrische Licht- und Kraftanlagen.

216. Betriebsanweisung der Feuerversicherungs-Gesellschaften.	334
---	-----

Isolationsfehler und deren Entstehung.

217. Überwachung der Anlagen	336
218. Ursachen der Isolationsfehler	337
219. Einflüsse auf die Isoliermittel	337
220. Auftreten von Fehlern	338
221. Kurzschluss	341
222. Erdschluss	342
223. Leitungsbrüche	342
224. Zulässiger Isolationswiderstand	342
225. Der Isolationswiderstand der Leitungen in gefährdeten Räumen	345
226. Der Isolationswiderstand von Freileitungen	348
227. Prüfung einer Anlage nach Fertigstellung und während des Betriebes	348
228. Revisionen	349
229. Rückwirkende Kraft der Sicherheitsvorschriften	350

	Seite
Massregeln zur Herbeiführung persönlicher Sicherheit in elektrischen Anlagen.	
230. Vorsichtsmassregeln an elektrischen Maschinen	352
231. Schutzmassregeln an Transformatoren	353
232. Schutzmassregeln in Akkumlatorenräumen	353
233. Schutzmassregeln an Schalttafeln	354
234. Schutzanordnungen durch die Konstruktion der Apparate	355
235. Vorsichtsmassregeln in Centralen	356
236. Warnungszeichen	356
237. Schutzmassregeln an Freileitungen	357
238. Schutzmassregeln in den Anlagen selbst	361
Vorsichtsmassregeln bei Arbeiten in elektrischen Anlagen während des Betriebes.	
1. Bei Niederspannung.	
239. Betriebsarbeiten	365
2. Bei Hochspannung.	
240. Instruktionen für das Personal	365
241. Abschaltung, Kurzschliessung und Erdung von Hochspannungsleitungen	366
242. Arbeiten während der Betriebspausen. Verabredung auf Zeit	368
243. Einsetzen von Sicherungen während des Betriebes	368
244. Gummihandschuhe	370
I. Messung des Isolationswiderstandes von sechs Gummihandschuhen verschiedener Fabrikation (bei niedriger Spannung)	371
II. Bestimmung der zum Durchschlagen der Handschuhe nötigen Spannung	371
245. Hochspannungs-Schutzanzug	372
Schutz bei Bleiarbeiten.	
246. Bleivergiftungen	376
Unfallverhütungsvorschriften für die Betriebe der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik.	
Vorschriften für den Arbeitgeber.	
V. Elektrische Betriebe	377
247. Unfallverhütungsvorschriften	377
A. Stromerzeugungsanlagen	377
B. Stromverbrauchsanlagen	378
Vorschriften für den Arbeitnehmer.	
V. Elektrische Betriebe	379
Unglücksfälle.	
248. Zwei charakteristische Unfälle durch elektrische Schläge	380
Die Feuersicherheit elektrischer Anlagen und Massregeln zur Erhaltung derselben.	
249. Welche Räume sind als feuergefährlich aufzufassen?	383
250. Welche Räume sind als explosionsgefährlich aufzufassen?	388
251. Warenhäuser, Schaufenster	391
252. Theateranlagen	392
253. Massnahmen zur Herbeiführung grösserer Feuersicherheit in der Installation	393
254. Fehler in Schnurinstallationen	394
255. Entflammbarkeit von Schnurleitungen	395
256. Elektrische Anlagen als angebliche Verursacher von Bränden	397
257. Massregeln bei Bränden des Verbandes Deutscher Elektrotechniker	398
Massregeln bei Bränden.	
A. Betriebsanlagen	398
B. Installationen	398
C. Wiederinstandsetzung	399
Die Gefährdung der Feuerwehr beim Anspritzen stromdurchflossener Drähte.	
258. Versuche von Heinicke	399
Sachregister	401
Namenregister	417

Benutzte Literatur.

Allgemeine Bauzeitung (Försters).

Archiv für Post und Telegraphie, Berlin.

Bulletin de la Société internationale des Electriciens, Paris.

Dinglers polytechnisches Journal, Berlin.

Electrical Review, London.

Electrical Review, New York.

Electrical World and Engineer, New York.

Elektrotechnischer Anzeiger, Berlin.

Electroteknisk Tidsskrift, Christiania.

Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin.

Fortschritte der Elektrotechnik, Berlin.

Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, Oldenburg.

La lumière électrique, Paris.

Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung,
Wiesbaden.

Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien.

Baur, Das elektrische Kabel, Berlin.

Berufsgenossenschaft der Feinmechanik, Unfallverhütungs-Vor-
schriften.

Blavier, Nouveau traité de Télégraphie électrique, Bd. II.

Delamarche, Elemente der unterseeischen Telegraphie, übersetzt von
C. Wichelmann, Berlin 1859.

Erhard, Der elektrische Betrieb im Bergbau, Halle.

Erlacher, Georg J., Elektrische Apparate, Hannover.

Friese, Das Porzellan.

Grawinkel und Strecker, Hilfsbuch für die Elektrotechnik, Berlin.

Grimm, Fabrikation des Feldspatporzellans, Wien.

Heinke, Handbuch der Elektrotechnik, Leipzig, Bd. VI, 1.

— Handbuch der Elektrotechnik, Leipzig, Bd. XII (abgekürzt Hdb.).

- Herzog und Feldmann, Elektrische Beleuchtung, Berlin 1902.
Highton, Electric telegraf.
Hütte, Taschenbuch, Berlin.
Jaenicke, Geschichte der Keramik, Leipzig.
Kerl, Handbuch der Thonwarenindustrie, Braunschweig.
Ludewig, Bau von Telegraphenlinien.
Meili, Die elektrischen Stark- und Schwachstromanlagen und die Gesetzgebung, Zürich 1899.
Miller, Versorgung der Städte mit Elektrizität, München.
Monmerqué, Contrôle des installations électriques, Paris 1904.
Peschel, Hilfsbuch für die Montage elektrischer Leitungen, Leipzig.
Pflaghart, Die Elektrizität als Rechtsobjekt, Strassburg 1901.
Pohl, Montage elektrischer Anlagen, Hannover.
Reichspostamt, Denkschrift „50 Jahre elektrischer Telegraphie“.
Uppenborn, Kalender für Elektrotechnik, München.
Verband Deutscher Elektrotechniker.
 Normalien, Berlin.
 Sicherheitsvorschriften für den Bau elektrischer Anlagen, Berlin.
 Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Anlagen, Berlin.
 Massregeln bei Bränden.
Vereinigung der Elektrizitätswerke.
 Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Anlagen.
Weber, C. L., Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für den Bau elektrischer Anlagen, Berlin.
Wengler, Elektrizität und Recht, Leipzig 1900.
Wietz, Die elektrischen isolierten Leitungsdrähte, Leipzig.
Wiedemann, G., Elektrizität, Braunschweig.
Zetsche, Handbuch der Telegraphie, Leipzig.
 Deutsche, englische, amerikanische Patentschriften.
 Deutsche Gebrauchsmuster.
- - - - -

Sicherheitsvorschriften für diese, dass sie mit Bezeichnungen versehen sein müssen,¹⁾ aus denen hervorgeht, zu welchen Räumen bzw. Gruppen von Stromverbrauchern sie gehören. Es ist nun durchaus nicht erforderlich, alle die Räume auf der Schalttafel namentlich aufzuführen, die eine Leitung mit Strom versorgt, es genügen Zahlen oder Buchstaben, die in einem besonderen Verzeichnis erläutert sind. Durch Anbringung eines Schaltungsschemas in unmittelbarer Nähe der Schaltstelle wird die Übersicht erleichtert.

Bei der Konstruktion der Schalttafeln ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass alle Apparate, an denen geschaltet werden muss, so angeordnet sind, dass sie bequem bedient werden können. Sie werden daher zumeist in handlicher Höhe befestigt und wo dieses, wie z. B. bei Hochspannungsschaltern, nicht möglich ist, durch Zugseile²⁾ oder Zugstangen bewegt, deren Griffe im Handbereich liegen.

Wichtig ist auch die Reihenfolge, in welcher die Apparate in den Stromkreis eingeschaltet werden. Üblich ist es ja, unmittelbar hinter jedem Abzweig die Sicherung folgen zu lassen und darauf den Schalter. Diese Anordnung ist aber bei Schalttafeln nicht immer unbedenklich, da in diesem Falle die Sicherung stets unter Spannung eingesetzt werden muss. Man verändert daher häufig bei den Schaltanlagen die Reihenfolge und setzt den Schalter zuerst. Dann ist allerdings der Schalter ungesichert und kann, wenn ein Kurzschluss an den Leitungen zwischen Schalter und Sicherung eintritt, zerstört werden. Indessen dürfte die letztere Anordnung wohl den Vorzug verdienen, da die Wahrscheinlichkeit eines Kurzschlusses an der betreffenden Stelle bei guter Ausführung der Anlage nicht besonders gross, dagegen die erhöhte persönliche Sicherheit von grösster Bedeutung ist.

2.
Anordnung
der Schalt-
tafeln.)

Es ist zu unterscheiden zwischen Schalttafeln, welche an der Wand befestigt werden und solchen, welche frei stehen. Die ersteren sind meistens nur kleinere Verteilungstafeln. Bei diesen macht die Leitungsführung einige Schwierigkeiten. Auf der Vorderseite werden die Leitungen nicht mehr gern verlegt; ordnet man sie in diesem Fall aber auf der Rückseite an, so sind sie unzugänglich und die Anschlüsse unkontrollierbar, weil die Tafel unmittelbar an der Wand oder doch nur mit geringem Abstand von ihr befestigt wird.

Die Montage der zu diesen Tafeln führenden Leitungen erfolgte häufig so, dass von einem Mann die Schalttafel von der Wand abgehalten wurde, der andere stellte die Verbindung her und dann wurde die Schalttafel an die Wand gepresst, was in der Regel nicht ohne Beschädigung der Leitungen abging, da diese, um die Schalttafel zum Zwecke der Befestigung der Leitungen weit genug von der Wand abrücken zu können, sehr lang gelassen werden mussten. Derart zusammengepresste Leitungsbündel waren dann eine Quelle von Erd- und Kurzschlüssen. Um diese zu vermeiden, müssen die Leitungen durch die Schalttafel geführt und an ihrer Vorderseite derart befestigt werden, dass es möglich ist, die Tafel nach Lösung der Schraubverbindungen frei abheben zu können. Die Verbandsvorschriften schreiben daher auch vor,⁴⁾ dass an Verteilungstafeln, welche nicht von der Rückseite aus zugänglich

1) § 4 f. der Sicherheitsvorschriften.

2) Vgl. Hdb. VI, 1: Schalter, Fig. 174, 175, 176.

3) Über die Massnahmen zur Erzielung hoher „persönlicher Sicherheit“ vgl. diese Hdb. VI, 2.

4) § 4 e.

infolge fortgesetzter Erschütterungen (in Maschinenräumen), allmählich und unbemerkt einstellt. Auch die durch den normalen Betrieb bedingte abwechselnde Erwärmung und Abkühlung der Schmelzsicherungen bewirkt eine allmähliche Lockerung der Kontaktschrauben. Hierzu kommt noch, dass die Holztafeln sich leicht werfen oder reissen,¹⁾ und zwar um so mehr, je grösser sie sind. Dabei sind schon Porzellanbestandteile der Apparate zerstört, auch Zähler und andere Messgeräte in Unordnung gebracht worden. Die grossen Stromstärken, welche an Schaltbrettleitungen herrschen, machen es erklärlich, dass auch scheinbar geringfügige Fehler schwerwiegende Folgen nach sich ziehen.

Zu den im vorstehenden gegen das Holz geltend gemachten Bedenken tritt bei Hochspannung noch das weitere Moment hinzu, dass bei Spannungen von mehreren Tausend Volt auch trockenes Holz sich wie ein Leiter verhält und direkt entflammt werden kann. Hier ist es also als wirklicher Bestandteil der Tafeln grundsätzlich ausgeschlossen. Die Zulassung zur Umrahmung ist nur mit Rücksicht auf Schönheitsgründe geschehen und es ist dabei vorausgesetzt, dass die Umrahmung von den stromführenden Teilen weit entfernt bleibt.“

Es werden daher fast ausschliesslich Platten aus Marmor, Schiefer und künstlichem Stein verwendet. Unter den verschiedenen Marmorsorten wird dem weissen entschieden der Vorzug gegeben. Schwarzer Marmor, der dem weissen in elektrischer Beziehung durchaus ebenbürtig ist, ist weniger beliebt, da er zu hart ist. Die bunten, marmorierten Sorten sollen nur mit Vorsicht verwendet werden, da sie häufig leitende Metalladern enthalten. Aus dem gleichen Grunde wird Schiefer mit Misstrauen betrachtet. Indessen sind gut ausgewählte Schieferplatten für Spannungen bis 500 Volt gut verwendbar.

Da die Steinplatten gegen Stösse sehr empfindlich sind, so ist bei der Bearbeitung vorsichtig zu verfahren. An den Befestigungsstellen sind auch elastische Zwischenstücke (Pappe) zwischen Eisenrahmen und Platte anzuordnen.

4.
Die Um-
rahmung.

Da die Schalttafeln in den Zentralstationen als besondere Zierde gelten, wird den Umrahmungen bisweilen die grösste Aufmerksamkeit geschenkt. Sie bestanden früher ausschliesslich aus Holz, und zwar wurde der Umrahmung aus Eichenholz zumeist der Vorzug gegeben. Mit der fortschreitenden Erkenntnis der Unzulänglichkeit des Holzes für den Schalttafelbau im allgemeinen nahm die Verwendung von Eisen auch für die Umrahmung zu. In vielen Fällen, besonders wenn die Marmortafeln möglichst dicht aneinander gereiht werden, verzichtet man auch wohl ganz auf eine Umrahmung (Fig. 13).

Jedenfalls ist Eisen aus Sicherheitsgründen der Verwendung von Holz auch hier vorzuziehen, ganz abgesehen davon, dass auch vom künstlerischen Standpunkt Einwendungen gegen Umrahmungen aus Eisen nicht erhoben werden können (vgl. z. B. Fig. 14 u. 15).

5.
Anordnung
der
Apparate.

Je einfacher und übersichtlicher die Apparate angeordnet werden, um so besser ist es. Man wird daher auch auf der vorderen Seite einer Schalttafel nur diejenigen Apparate anbringen, die zur Überwachung und Schaltung unbedingt erforderlich sind. Hierher gehören in erster Linie die Messinstrumente für die Maschinen, die Maschinenschalter und die Handräder der Regulatoren.

Im übrigen wird man Schalter, die zwar ab und zu, aber selten bedient werden, wie z. B. die in Hauptabzweigleitungen liegenden, gern hinter

1) Um diesen Übelstand zu beseitigen werden grosse Holztafeln parkettiert.

Fig. 2.

—

Fig. 3.

abgetrennten Teil, in welchem die Spannung von 500 auf 3000 Volt transformiert wird. Die Leitungen für diese Transformatoren sowie ihre Anschlüsse liegen vollständig geschützt.



Die Konstruktion der Schaltanlagen.

Die Konstruktion der Schaltanlagen kann sehr verschieden sein; es lassen sich etwa die folgenden Gruppen bilden:

1. Kleine Schalttafeln, bei denen nur eine Platte vorhanden ist, die an der Wand befestigt wird.

3.
Einteilung
der Schalt-
anlagen

Fig. 8.

(Fig. 10) oder durch die Steinplatten verdeckt werden (Fig. 13). Sie werden aus  und -Eisen zusammengesetzt, die Ecken durch dreieckige Platten verbunden (Fig. 7 u. 8). Diese versteifen das Gerüst und dienen gleichzeitig

zur Befestigung der Platten. Jedenfalls werden die horizontalen Eisen so angeordnet, dass sich die Platten in ihrer ganzen Breite auf sie stützen und die Befestigungsbolzen in den Platten zum Tragen nicht herangezogen werden.

Reichen die Platten nicht ganz bis zum Fussboden, so wird der untere Teil der Schalttafel meistens durch Eisenblech verkleidet, welches entweder perforiert ist oder durch besonders aufgesetzte Leisten verziert wird.

Nach der Wand zu werden in der Regel Winkeleisen als Stützen angebracht, die in die Wand eingelassen werden. Damit sie dort den nötigen Halt bekommen, werden sie gespalten und aufgebogen. Sie dienen gleichzeitig als Träger für die Isolatoren (Fig. 8, 16 und 24).

Da die Schalttafeln in verschiedene Felder¹⁾ eingeteilt werden, so wird die Eisenkonstruktion so eingerichtet, dass sie aus einzelnen Elementen besteht, die eventuell in der einfachsten Weise eine Erweiterung gestatten.

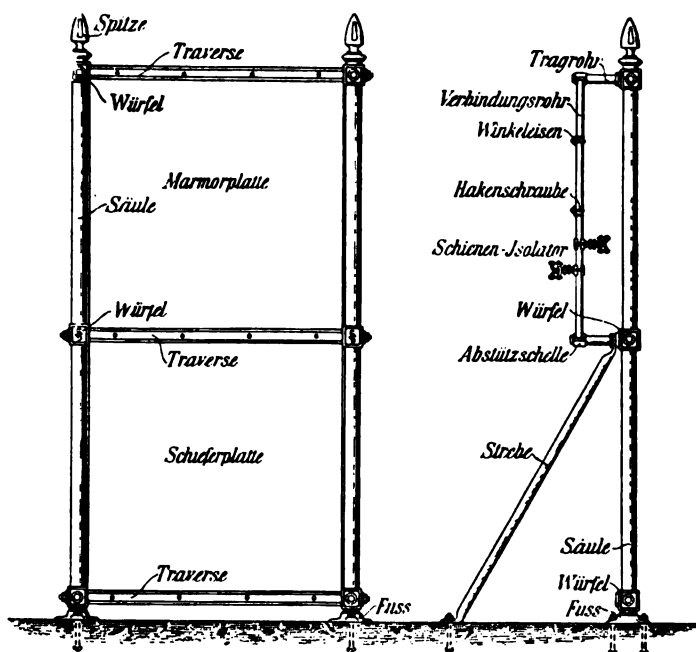


Fig. 9.

10.
Eiserne
Normal-
Schalttafeln
der Siemens-
Schuckert-
Werke.

Um möglichst einheitlich zu arbeiten, sind auch die Gerüste normalisiert worden; es sind in Fig. 6 und 9 bis 12 diejenigen der SIEMENS-SCHUCKERT-Werke dargestellt. Diese bieten gegenüber den allgemein üblichen Konstruktionen verschiedene Vorteile, denn die Gerüste bestehen aus verhältnismässig wenigen und vor allem aus normalen Eisenteilen, die stets zu erhalten sind. Ein Zusammensetzen kann daher, ebenso wie eine Erweiterung, ohne jede Schwierigkeit vorgenommen werden.

Die Felder der Normalschalttafeln können mit Marmor-, Schiefer- oder Eisenplatten versehen werden. Die Marmorplatten werden auf der Vorder-

Die Aufstellung des Eisengerüsts erfolgt in Niederspannungsanlagen in der Regel auf dem Maschinenfussboden ohne isolierende Zwischenglieder. Hat man es aber mit einer Dreileiteranlage mit geerdetem Mittelleiter zu thun, so isoliert man gern das ganze Eisengerüst gegen Erde, da jede metallische Verbindung zwischen einem Aussenleiter und dem Gerüst, also Erde, Kurzschluss bedeutet.

Auch bei Hochspannungsanlagen findet diese Isolierung bisweilen statt, selbst wenn man die Apparate durch vorzüglich isolierende Zwischenlagen vom Gerüst trennt.²⁾


1) Vgl. S. 5.

2) Näheres über die Anordnungen zum persönlichen Schutz an Schalttafeln siehe Hdb. VI, 2: Persönlicher Schutz.

stellt eine Schalttafel mit drei gleich hohen Feldern und einem breiten Aufsatz dar. Diese Anordnung kann auch für freistehende Schalttafeln von grösserer Tiefe verwendet werden und empfiehlt sich bei solcher von 500 mm und mehr, und wenn das Traggerüst schwere Apparate, z. B. Ölschalter, aufnehmen soll.

Sind nicht allein an den Vorder-, sondern auch an den Seitenflächen von Schalttafeln Apparate anzuordnen, so lassen sich aus den Einzelteilen bequem entsprechende Erweiterungen ausführen.

11.
Schalttafeln,
bei denen
die Platten
die ganze
Fläche der
Tafel ein-
nehmen.

Die äusseren Platten werden in die -Eisen des Gerüsts gelegt. Wo die Platten zusammenstossen, liegen Flacheisen, auf denen die Platten durch Messingschrauben befestigt werden (Fig. 13). Hierbei stossen die Platten so dicht zusammen, dass Abschlussleisten nicht erforderlich sind. Höchstens werden die Platten an diesen Stellen sauber facettiert. Kommen die Platten nicht ganz zusammen, vielleicht, weil ein Teil des Eisengerüsts dazwischenragt, so werden die Stossstellen durch besondere Zierleisten (Fig. 14) verdeckt. Diese Leisten können aber auch direkt zur Befestigung der Platten herangezogen werden. Fig. 13 zeigt eine amerikanische Schalttafel mit sehr

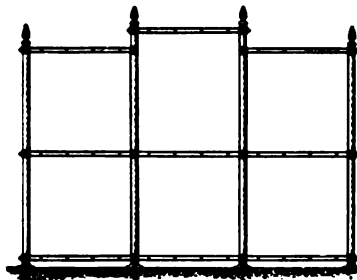


Fig. 11.

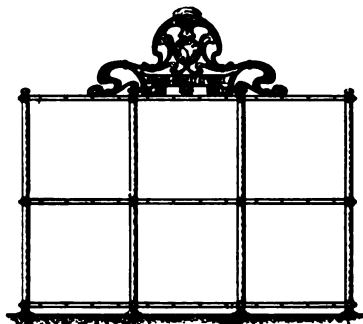


Fig. 12.

grossen Marmorplatten, sie ist ohne Umrahmung ausgeführt. Wesentlich kleinere Platten zeigt die Schalttafel in Fig. 14, die mit einer kunstvoll geschmiedeten Eisenumrahmung versehen ist.

Da sehr lange Schalttafeln nüchtern wirken, wenn alle Teile derselben in gleicher Höhe ausgeführt sind, so werden die mittleren Felder erhöht angeordnet.

12.
Schalttafeln,
bei denen
nur die
obere Hälfte
mit Platten
bedeckt ist.

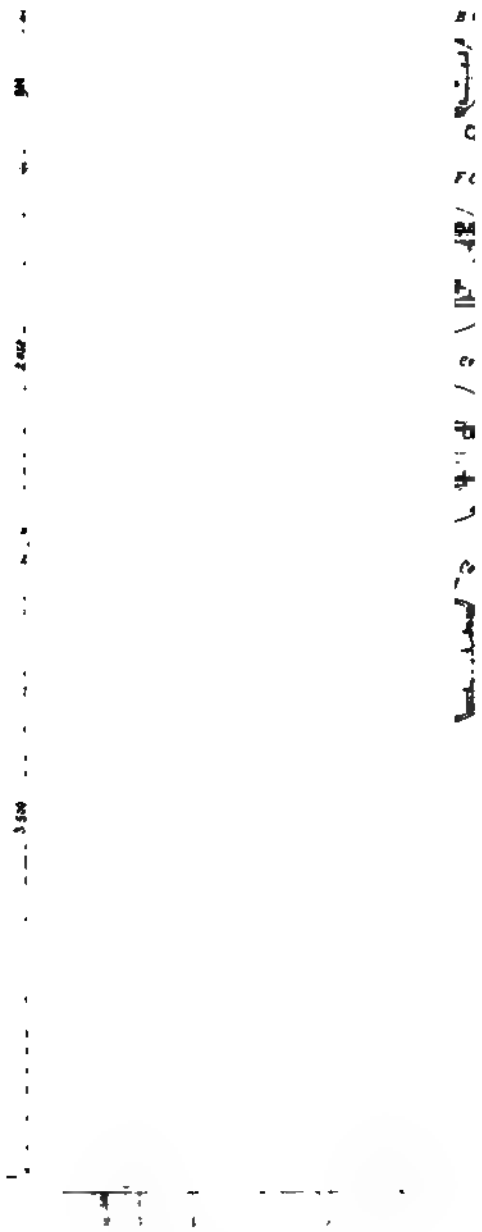
Fig. 15 zeigt eine derartige Schalttafel. Des besseren Aussehens wegen sind auch hier die mittleren Felder gehoben. Der untere Teil besteht aus Blechen, auf welche Zierleisten aufgesetzt sind. Die Widerstände sind so hinter der Schalttafel angeordnet, dass ihre Stufenschalter aus der unteren Blechverkleidung herausragen. Ihrer Höhe wegen ist auch die untere Blechverkleidung in den Mittelfeldern höher gezogen als an den Seiten. Die Umrahmung besteht aus Holz.

13.
Schalt-
anlagen ohne
Platten.

Diese Schalttafel umfasst nicht nur die zum Betriebe der Zentralstation erforderlichen Apparate, auf ihr sind auch die zur Stromverteilung in ihre einzelnen Zweige erforderlichen Sicherungen und Schalter angebracht, und zwar sind für diesen Zweck die Seitenfelder gewählt. Statt der in Fig. 15 gekennzeichneten Art der Bleche könnten auch perforierte verwendet werden. Sollen an Verteilungspunkten grössere Mengen von Sicherungen u. s. w. zusammengefasst werden, die in ihrer Grösse wenig voneinander differieren;



Fig. 16.



1000
 2000
 3000
 4000
 5000
 6000
 7000
 8000
 9000
 10000

Schnell J. N. Coupe
 Type 1000 Paris

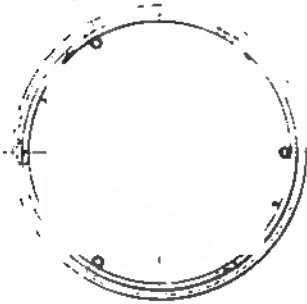


Fig. 18.

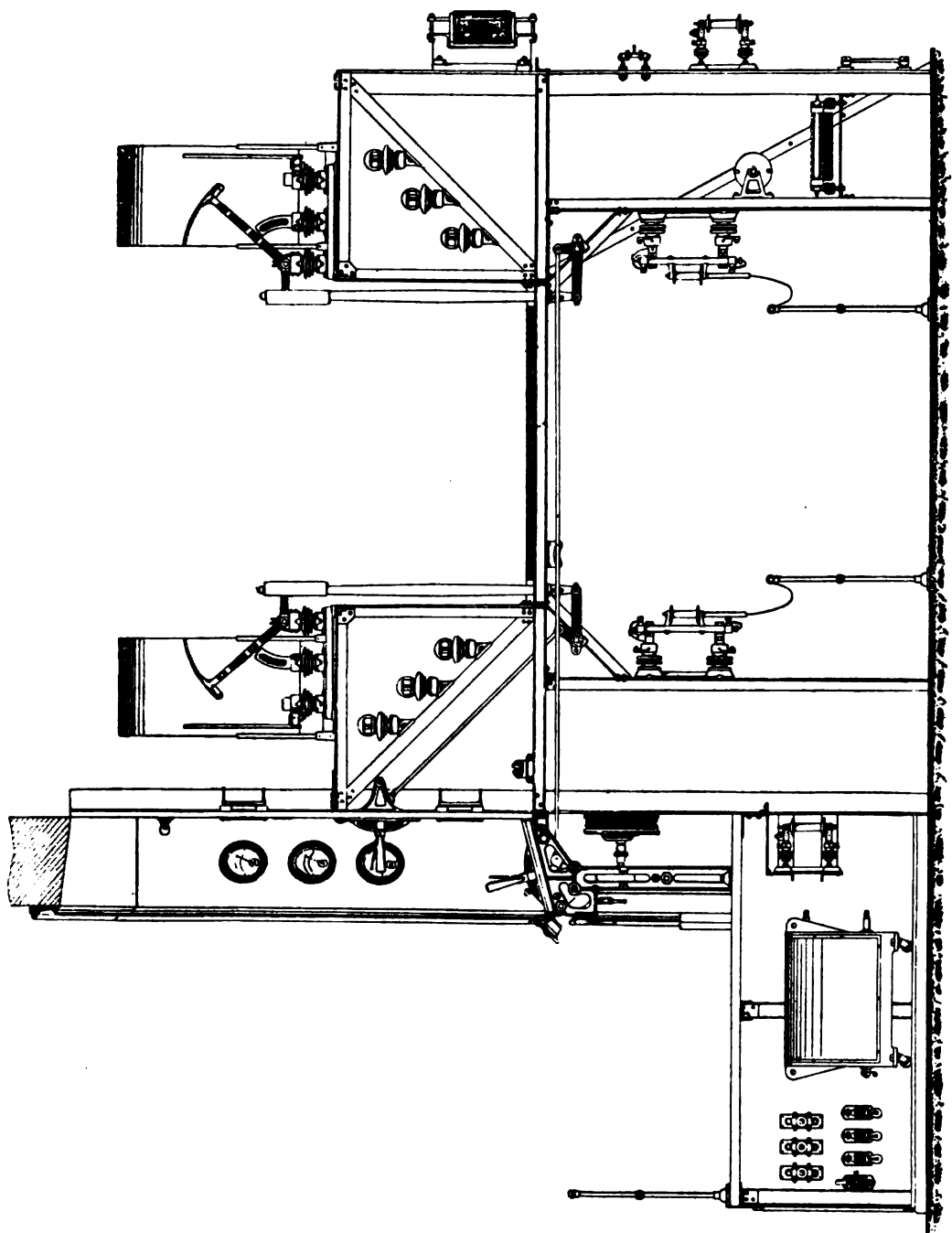


Fig. 22 n.

dass die Schienenseiten erst durch die Verbindungsbolzen gewaltsam zusammengeholt werden mussten. Der Monteur fühlte sich auch nicht berufen, die rohen Schienen besonders nachzuarbeiten, da das zwischengelegte Stanniol alle Unebenheiten ausgleichen sollte.¹⁾ Es bestand somit von vornherein ein schlechter Kontakt. Gesetzt aber selbst den Fall, die Schienen werden gut aneinander gepasst, so bedingen die häufigen Temperaturwechsel der Schienen bei Belastungsänderungen, dass die Verbindungsschrauben gelockert und die Verbindung sich weniger innig gestaltet. Die Verbindungsstelle erwärmt sich, das leicht flüssige Stanniol schmilzt heraus und nunmehr wird der Kontakt nahezu aufgehoben und der Widerstand an der Verbindungsstelle so gross, dass Bolzen und Schiene glühend werden. Es ist somit erforderlich, Schienenverbindungen so gut als irgend möglich ohne Zwischenlage zusammenzupassen, so dass sich die Schienen innig berühren. Die Stossstellen sind gut zu verzinnen. Allerdings können auch an solchen gut hergestellten Verbindungen die Schrauben sich infolge wechselnder Erwärmung lockern und ist es daher Sache der Betriebsleitungen, dafür zu sorgen, dass an allen Schalttafeln die Verbindungsbolzen ab und zu nachgezogen werden. Um Fehler an Schalttafeln auf ihren Herd zu beschränken, können Trennschalter (siehe diese Hdb. VI, 1) in die Sammelschienen eingebaut werden, die auch bei der Vornahme von Arbeiten an der Schalttafel gute Dienste leisten.

21.
Verlegung
von Kupfer-
schienen.

Fig. 23.

Die Verlegung von Kupferschienen erfolgt, wenn es sich um Spannungen unter 250 Volt handelt, ausser auf Glockenisolatoren vielfach auf den in Fig. 23 abgebildeten Schienenklammern, die der Anzahl der Leitungen entsprechend auf einen eisernen Bolzen nacheinander aufgereiht werden. Die Leitungen werden möglichst alle Meter unterstützt, jedoch ist es zweckdienlich, um ein Zusammenschlagen zwischen den Befestigungsstellen zu vermeiden, die Schienen noch durch besondere Distanzklemmen voneinander fern zu halten (besonders wichtig bei Zellschalterleitungen).

Um ein bequemes Anschliessen der Leitungen zu ermöglichen, insbesondere um Krüpfungen starker Leitungen zu vermeiden, werden an kleineren Tafeln die Sammelschienen stufenförmig angeordnet; zu einer derartigen Befestigung dienen dann in der Regel stufenförmige Gusskörper (Fig. 23a), in welche Porzellanisolierdübel eingekittet werden. Auf ihnen werden dann die Kupferschienen festgeschraubt (SIEMENS-SCHÜCKERT-Werke).

Für Spannungen über 250 Volt werden stets Isolatoren verwendet, auf deren Kopf gusseiserne Kappen festgekittet werden, in deren schlitzförmige Aussparung die Kupferschiene gelegt wird (Fig. 24).

Fig. 23a

1) Pöhl, Die Montage elektrischer Licht- und Kraftanlagen, Hannover 1906.

-
.

Fig. 24.

Schaltbrett der Zentrale in Bonn). In Fig. 25 wird ein Schienenisolator von LAHMEYER & Co. wiedergegeben, der sich sehr vorteilhaft verwenden lässt.

Bei grossen Zentralen werden häufig sehr viel Kupferschienen verwendet und ist es daher erforderlich, um die Arbeiten zu fördern, Schienenbiegevorrichtung und Lochstanzen zur Stelle zu haben.

Fig. 25.

In den Fällen, wo Akkumulatorenbatterien verwendet werden und die Zellschalter auf der Schalttafel montiert sind, muss die Anordnung dieser so getroffen werden, dass für die grosse Anzahl der Zellschalterleitungen ein möglichst kurzer Weg gewählt werden kann.

Damit man sich über die Polarität oder Phase der hinter einer Schalttafel liegenden Leitung schnell zu orientieren vermag, werden sie durch ver-

- b) Lage, Querschnitt und Isolierungsart der Leitungen. Der Querschnitt wird, in Quadratmillimetern ausgedrückt, neben die Leitungslinien gesetzt. Die Isolierungsart wird durch die unten angeführten Buchstaben bezeichnet.
- c) Art der Verlegung (Isolierglocken, Rollen, Ringe, Rohre u. s. w.) und Art des Schutzes; hierfür sind ebenfalls nachstehend Bezeichnungen angegeben.
- d) Lage der Apparate und Sicherungen.
- e) Lage und Art der Lampen, Elektromotoren und sonstigen Stromverbraucher.

Zusatz für Hochspannung:

- f) Für die Verbrauchsstellen müssen Pläne verwendet sein, auf welche ein grosser roter Blitzpfeil eingezeichnet ist und die Spannungen vermerkt sind.

Sind in einem Plan Hoch- und Niederspannungsleitungen eingezeichnet, so sind die Hochspannungsleitungen mindestens am Anfang und Ende durch Blitzpfeil zu kennzeichnen.

- g) Sämtliche im Plan eingezeichneten Stangen müssen mit ihren Nummern bezeichnet sein.

× = Feste Glühlampe.

~× = Bewegliche Glühlampe.

⊗ 5 = Fester Lampenträger mit Lampenzahl (5).

3 ~⊗ = Beweglicher Lampenträger mit Lampenzahl (3).

Obige Zeichen gelten für Glühlampen jeder Kerzenstärke, sowie für Fassungen mit und ohne Hahn.

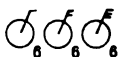
⊙ 6 = Bogenlampe mit Angabe der Stromstärke (6 Amp.).

⊙⁶_D = Dauerbrandlampe mit Angabe der Stromstärke (6 Amp.).

⊙ 10 = Dynamomaschine bzw. Elektromotor jeder Stromart mit Angabe der höchsten zulässigen Beanspruchung in Kilowatt.

 = Akkumulatoren.

)-6 = Wandfassung, Anschlussdose mit Angabe der Stromstärke (6 Amp.).


 = Einpoliger, bzw. zweipoliger, bzw. dreipoliger Ausschalter mit Angabe der höchsten zulässigen Stromstärke (6 Amp.).


⊘ 3 = Umschalter, desgl.


—| = Sicherung (an der Abzweigstelle).

⊠ 10 = Widerstand, Heizapparate u. dergl. mit Angabe der höchsten zulässigen Stromstärke (10 Amp.).


~⊠ 10 = Desgl., beweglich angeschlossen.

 7.5 = Transformator mit Angabe der Leistung in Kilowatt (7.5).

 = Drosselspule.

 = Blitzschutzvorrichtung.

—> ← = Spannungssicherung.

 = Erdung.

 = Blitzpfeil.

$\boxed{5} \mid \boxed{20}$ = Zweileiter- bzw. Dreileiter- oder Drehstromzähler mit Angabe des Messbereiches (5 bzw. 20 Kilowatt).

—— = Zweileiterschalttafel.

== = Dreileiterschalttafel oder Schalttafel für mehrphasigen Wechselstrom.

..... = Einzelleitung.

—— = Hin- und Rückleitung.

..... = Dreileiter- oder Drehstromleitung.

..... = Fest verlegte Mehrfachleitung jeder Art.

↗ = Nach oben führende Steigleitung.

↘ = Nach unten führende Steigleitung.

● = Holzmast.

● = Eisenmast.

BC = Blanker Kupferdraht.

BE = Blanker Eisendraht.

GB = Gummibandleitung.

GA = Gummiaderleitung.

MB = Mehrfach-Gummibandleitung.

MA = Mehrfach-Gummiaderleitung.

SGA 3000 = Spezial-Gummiaderleitung mit Angabe der Betriebsspannung (3000 Volt).

SMA 1500 = Mehrfach Spezial-Gummiaderleitung mit Angabe der Betriebsspannung (1500 Volt).

PA = Panzerader.

SPA 3000 = Spezial-Panzerader mit Angabe der Betriebsspannung (3000 Volt).

FA = Fassungsader.

SB = Gummibandschnur.

SA = Gummiaderschnur.

PL = Pendelschnur.

KB = Blanke Kabel.

KA = Asphaltierte Kabel.

KE = Armierte, asphaltierte Kabel.

(*g*) = Verlegung auf Isolierglocken.

(*r*) = Verlegung auf Rollen oder Ringen.

(*k*) = Verlegung auf Klemmen.

(*o*) = Verlegung in Röhren.

(*f*) = Schutz durch Eisen.

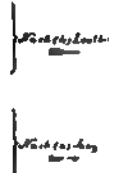
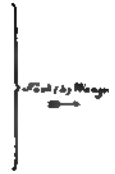
(*l*) = Schutz durch isolierende Verkleidung.

(*n*) = Schutznetz.

(*e*) = Schutz durch Erdung.

Um zu zeigen, in welcher Art die im Vorhergesagten geforderten Pläne und Schaltungen ausgeführt sein müssen, sind zwei Beispiele angegeben: ein Installationsplan (Fig. 26) und das Schaltungsschema der Kraft- und Lichtverteilungsanlage Wangen i. Allgäu (Fig. 27), erbaut von Örlikon.

24.
Beispiele
eines Planes
und eines
Schaltungs-
schemas.



Leit. i
K

Leit. Leucht.

K

Fig. 27. Schaltungsseheema der Kraft- und Lichtverteilungsanlage Wanken i. Allgäu.

G_I, G_{II} - Drehstrom-Generatoren. U_T, M_T - Meiststransformatoren. B - Blitzschutzvorrichtungen.
 E - Erregerdynamo. A_M - Umschalter. P - Phasenlampen.
 A, A' - Amperemeter. U - Umschalter. K - Rheostat.
 V - Voltmeter. R_I, R_{II} - Regulatoren. d - Explosive.
 T - Transformator. S - Sicherung. $V_T, V_T's$ - Voltmeter-Umschalter.

Die Leitungsverbindungen.

Wenn man von den dünnsten Drähten und Seilen absieht, muss jede Leitung ein vermittelndes Glied erhalten, welches den Anschluss an die Apparate oder die Verbindung zwischen zwei Leitungen ermöglicht. In dem letzteren Falle kann das Verbindungsstück wegfallen, wenn es sich um Installationsdrähte handelt, die gut miteinander verlötet werden. Alle Verbindungsstellen müssen nicht nur eine vorzüglich leitende Vereinigung herstellen, sondern sie müssen auch so beschaffen sein, dass Feuchtigkeit und chemische oder atmosphärische Einflüsse die Güte der Verbindung nicht beeinträchtigen können. Dass mechanische Beanspruchungen unschädlich gemacht werden müssen, sei es durch die Art der Verbindung, sei es durch die der Verlegung, ist selbstverständlich; indessen ist z. B. bei unterirdisch verlegten Kabeln und Freileitungen dieser Umstand besonders zu beachten.

25.
Allgemeines
über
Leitungs-
verbindun-
gen.

Die Verbindung von Leitungen untereinander, sowie die Abzweigung von solchen geschieht mittels Lötung, Verschraubung oder gleichwertiger Verbindung.

Diese Stellen müssen ebenso fest wie der Leitungsdraht selbst sein und es muss vollkommener Kontakt herrschen, da sonst der durchfließende Strom die Verbindungsstelle erhitzt und mit der Zeit zerstört.

Um elektrolytische Vorgänge, welche ebenfalls mit der Zeit zerstörend wirken, zu vermeiden, sollen mit Ausnahme des Lotes keine anderen Metalle als Verbindungsmaterial verwendet werden, d. h. es dürfen für Kupferleitungen keine Eisenverbindungen u. s. w. gewählt werden. Dasselbe gilt von den Bindedrähten, welche die Leitungen auf den Isolatoren halten.

Kabelgarnituren.

Hierunter versteht man alle Apparate, die zur Verbindung und Verteilung der Kabel oder zum Anschliessen von deren Enden verwendet werden, wie: Verbindungs-, Abzweig- und Kreuzmuffen, Kabelverteilungskästen und Endverschlüsse u. s. w.

Endverschlüsse.

Besonders schwierig sind die Verbindungen bei Kabeln herzustellen, da dieselben, wie an anderer Stelle dieses Bandes auseinandergesetzt, zum Teil eine Isolierung aus Fasergespinsten erhalten, die gern Feuchtigkeit aufnehmen.

26.
Zweck der
End-
verschlüsse.

36.
Endver-
schlüsse
für ver-
seilte
Kabel.

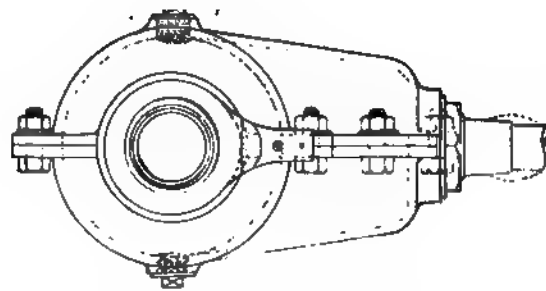


Fig. 37.

sind sie unter Zwischenschaltung geeigneter Isolierstücke mit dem Verschlusskörper fest verbunden. Der letztere ist in der Regel mehrteilig, sei es, dass er in der Längsrichtung geteilt wird, wie es Fig. 35, Endverschluss für verseilte Dreileiterkabel der Land- und Seekabelwerke, zeigt, sei es, dass das ungeteilte Gefäß auf den unteren Teil aufgeschraubt wird, nachdem man es über die Verbindungsstelle herübergezogen hat (Fig. 36 FELTEN & GUILLEAUME). Die Ausführungsstellen werden durch besondere Isolierhülsen aus Porzellan, Hartgummi, Stabilit oder dergl. vor der Berührung mit dem Gehäuse geschützt.

je zwei Flanschen *F* festgeklemt, an denen die Anschlüsse durch Schrauben *S* hergestellt werden. Die übrigen frei gelegten Teile des Kabels werden durch Gummischläuche *G* geschützt, die so lang sind, dass sie über die Rohransätze der Flanschen hinwegfassen. Sie werden mit Binddraht festgebunden. Derartige Endverschlüsse werden bis zu 2000 Volt verwendet.

Darüber hinaus findet die in Fig. 34 gezeigte Anordnung Verwendung. Die einzelnen Drähte werden vom Kabel abgebogen und zu einem Seil zusammengedreht, welches nunmehr in die gewöhnlichen Klemmvorrichtungen passt.

Es können aber auch Ringanschlüsse Verwendung finden, die um die konzentrischen Leiterschichten gelegt werden (z. B. Fig. 41).

Um verseilte Faserstoffkabel in ihre Einzelleiter aufzulösen, bedarf es ebenfalls besonderer Endverschlüsse. Die Verbindungen der einzelnen Kabeladern mit den abgehenden Leitungen erfolgt, wie es auch Fig. 34 schon für konzentrische Kabel zeigt, durch Verbindungshülsen, die sich innerhalb von Gefäßen befinden, welche ausgegossen werden. Die Verbindungsstücke sind teils lose, teils

Das Kabelende und die Mitte des Klemmbrettchens muss nach der Montage etwa in zwei Drittel Länge des Endverschlusses liegen. Nach diesem Anhaltspunkte richten sich die Abstufungen des Kabels. Es wird zunächst am Ende des Einführungshalses, wo die Rille für die Juteschnur beginnt, ein Drahtbund um das Kabel gewickelt. Alsdann wird durch einen Schnitt rings um das Kabel die obere Jutelage durchschnitten und auf das Ende zu abgewickelt. Darauf wird mit einer Dreikantfeile die Eisenarmatur ringsum eingefeilt und abgezogen. Dann wird die darunterliegende Jutelage wie die obere Lage entfernt, so dass der Bleimantel bis zum Ende freiliegt. Nun wird in einem Drittel der Innenraumlänge des Endverschlusses von dem Drahtbund ab der Bleimantel mit einem scharfen Messer ringsum eingeschnitten. Dieser Schnitt darf die darunterliegende Isolierschicht nicht verletzen. Dann wird etwa 1 cm weiter die obere Isolierschicht mit Garn abgebunden, bis auf die Isolierung der beiden Leiter eingeschnitten und abgelöst. Hierauf werden letztere, dem Nutenabstand der Klemmen entsprechend, auseinandergebogen und so weit vom Ende mit Garn abgebunden, als die reichliche halbe Länge der Klemmen beträgt. Das Abbinden hat den Zweck, das Ausfasern der Isolierschicht zu verhindern. An dem Garnbund wird nun die unterste Isolierung ebenfalls ringsum eingeschnitten und abgelöst, worauf die blanken Enden der Leiter in die Klemmen eingeschraubt werden. Die aus dem Endverschluss herausführenden Gummileitungen werden dann ebenfalls angeschnitten und in die Klemmen eingeschraubt, vorher aber muss der Stabilitdeckel des Endverschlusses auf dieselben aufgeschoben werden. Vor dem nun folgenden Umbau des Schutzgehäuses wird an der Stelle des Einführungshalses eine Packung aus mehreren Lagen getränkter Leinwand um das Kabel gewickelt, damit das spätere Auslaufen der Füllmasse verhindert wird. Dann werden die beiden Hälften des Schutzgehäuses aufgesetzt und fest miteinander verschraubt. Der Deckel wird zurückgeschoben und mit zwei Schrauben befestigt.

Nummehr wird die Füllmasse eingegossen. — Damit sich kein Wasser in dem Endverschluss beim Eingiessen der heissen Masse niederschlägt, muss derselbe vor dem Zusammenbau leicht angewärmt werden. Die Masse muss stets sorgfältig trocken aufbewahrt werden. Vor dem Eingiessen wird sie langsam zum Schmelzen gebracht; sie darf nicht überkochen oder anbrennen, wodurch sie unbrauchbar werden würde. Das Eingiessen muss in gut flüssigem Zustand langsam, aber stetig geschehen. Damit die sich bildenden Luftblasen Zeit haben an die Oberfläche zu steigen, ist es gut, die Muffe nicht mit einem Male vollzugiessen, sondern etwa in drei Absätzen, welche einige Minuten auseinanderliegen. Beim Erkalten schwindet die Masse ziemlich stark, es muss deshalb so lange nachgefüllt werden, bis das ganze Gehäuse gefüllt ist. Alsdann wird der Stöpsel ebenfalls leicht angewärmt und damit die Eingussöffnung verschlossen.

Verbindungsmuffen.

31.
Zweck der
Muffen.

Da Kabel nur in bestimmten Fabrikationslängen geliefert werden, sind Verbindungen dieser Kabellängen notwendig. Hierzu dienen besondere Verbindungsstücke, welche besonders gut geschützt werden müssen, da sie meistens im Erdreich liegen und nicht, wie der Endverschluss, oberhalb des Erdreiches in mehr oder weniger trockenen Räumen untergebracht werden.

Nun werden die Klemmen auf die freigelegten Litzen der Kabelenden aufgeschoben und durch Einkeilen der bereits erwähnten konischen Dorne befestigt. Es ist darauf zu achten, dass durch Einkeilen des Dornes die Klemme so stark befestigt werden muss, dass sie weder gedreht noch abgezogen werden kann. Es ist dies mit der wichtigste Teil der Montage, da durch den lockeren Sitz der Klemme Erwärmungen durch den Strom und damit weitere Störungen verursacht werden können.

Nach der Befestigung der Klemme wird an dem Ende der Armierung zur Abdichtung imprägnierte Leinwand aufgewickelt. Dieselbe muss so stark aufgewickelt sein, dass sie den Muffenhals vollständig ausfüllt und später das Auslaufen der Füllmasse verhindert. Die Dichtung muss ebenfalls mit Garn abgebunden werden.

Nachdem die Enden so zubereitet sind, werden sie in die richtige Lage gebracht und die Flansche der Klemmen durch die Schraubenbolzen miteinander verschraubt.

Darauf wird das Schutzgehäuse darangesetzt. In dem Unterteil desselben befindet sich am Rand eine Rille, in welche ein am Oberteil befindlicher Falz genau hineinpasst. In die Rille wird eine imprägnierte Juteschnur zur Abdichtung eingelegt. Mittels der vier Schraubenbolzen wird nun das Ober- und Unterteil fest miteinander verschraubt. Die Einzelheiten der bis zum Aufschrauben des Oberteils fertig montierten Muffe sind aus Fig. 39 u. 40 genau ersichtlich.

Nunmehr wird die Füllmasse in die Muffe gegossen, in gleicher Weise, wie es auf S. 44 schon beschrieben ist, und dann die Eingussöffnung verschlossen. Über den Verschlussstöpsel wird dann ein wenig Füllmasse gegossen. Das Eingiessen nimmt je nach der Grösse der Muffe eine bis drei Stunden in Anspruch.

Um ein Rosten der Muffen zu verhüten, erhalten dieselben einen heiss aufgetragenen Asphaltanstrich. In Fig. 39 ist noch eine Drahtverbindung zwischen dem Bleimantel und der Muffe erkennbar. Sie hat den Zweck, Spannungsunterschiede zwischen Blei und Erde und somit den Bleimantel gefährdende Erdströme auszuschliessen.

34.
Verbin-
dungsmuffen
der Land-
u. Seekabel-
werke,
Felten &
Guilleaume
u. Siemens
Broth.

Fig. 41 zeigt noch eine Verbindungsmuffe für konzentrische Kabel der Land- und Seekabelwerke und Fig. 42 eine solche für dreifach verseilte Kabel von FELTEN & GUILLEAUME. Bemerkenswert bei der letzteren ist noch, dass sich zwischen der Kabelschelle und der eigentlichen Muffenkammer noch eine Asphalt-Abdichtungskammer befindet mit den dem Durchmesser der Bleihüllen entsprechenden Bohrungen in den beiden Seitenwänden, um eine besonders gute Auflage des Bleimantels zu erreichen und ihn so gegen Beschädigungen bei Lagenveränderungen der Muffen zu schützen.

Eine andere Art der Verbindung von konzentrischen Kabeln zeigt noch die von SIEMENS BROTH., London, zur Verfügung gestellte Zeichnung Fig. 43.

Abzweig- und Kreuzmuffen.

35.
Konstruk-
tion.

Sie entsprechen in ihrer Anordnung durchaus den Verbindungsmuffen. Bei der Montage braucht in der Regel das durchgehende einfache Verteilungskabel nicht geschnitten zu werden, es ist nur nötig, die Kupferseele desselben auf die reichliche Breite der Klemme blosszulegen und nach beiden Seiten hin die Faserisolierung, den Bleimantel und die Jutelage mit der Eisenarmierung abzustufen.

36.
Abzweig-
muffen von
Siemens
Broth.

Es seien zunächst einige Abzweigmuffen von SIEMENS Broth. London besprochen. Fig. 119¹⁾ zeigt eine solche für konzentrische Kabel. Bemerkenswert ist die Art des Leiteranschlusses. Es wird ein mit einem wulstigen Ansatz versehenes Metallstück unter die abgebogenen konzentrischen Leerschichten geschoben und diese nunmehr so durch Bindendraht befestigt, dass sich die einzelnen Drähte fest in die Vertiefung schmiegen.

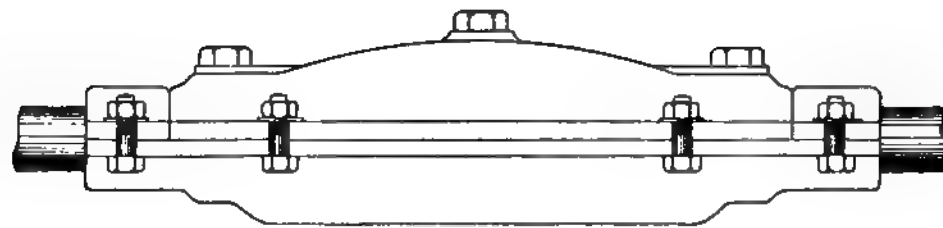


Fig. 46.

37.
Abzweig-
muffen der
A. E.-G.,
Land- und
Seekabel-
werke, Süd-
deutschen
Kabelwerke.

Fig. 120¹⁾ zeigt den Anschluss eines konzentrischen an ein konzentrisches Kabel und Fig. 140¹⁾ den Übergang von einem konzentrischen in zwei ver-seilte Kabel in einer Abzweigmuffe. Sämtliche Muffen sind zweiteilig. Bei der ersteren (Fig. 120) ist ausser dem oben beschriebenen Anschluss an ein konzentrisches Kabel die Verbindung mit dem abzweigenden Kabel bemerkenswert. Die konzentrisch gelagerten Drähte sind nach einer Seite gebogen, werden zusammengedreht und nunmehr wie ein gewöhnliches Seil in den Kabelschuh eingeführt.

1) Siehe Tafel am Ende dieses Bandes.

39.
Muffen-
bezeich-
nungen.

Während bei Verbindungsmuffen meistens dieselben Kabelquerschnitte zu verbinden sind, werden bei Abzweigmuffen oft die verschiedensten Querschnitte verbunden. Diese Armaturen werden daher so eingerichtet, dass möglichst viele Querschnitte in derselben Type vereinigt werden können. Dies geht natürlich nur bis zu einer gewissen Grenze, da der Ausgleich durch die Jutelagen, die den Abschluss an den Einführungsstellen bewerkstelligen, herbeigeführt werden muss (Fig. 49). Z. B. ist es aber üblich, Querschnitte von 25—95 mm², 120—240 mm² u. s. w. zusammenzufassen, wie auch die Aufschrift in Fig. 38 und 49 (A. E.-G.) zeigt. Bei der Bestellung von Abzweigmuffen müssen die genauen Querschnitte stets angegeben werden.

Kabelkästen.

40.
Konstruk-
tion.

Bei der Vereinigung von mehr als drei oder vier Kabeln an einem Punkt bedient man sich sogenannter Kabelverteilungskästen mit oder ohne Schmelzsicherungen. Diese Schaltkästen werden ebenfalls unterirdisch, und zwar in der Regel auf Fundamente gebaut und sind leicht zugänglich. Die Abdeckung geschieht vermittels Schachtrahmens und Deckels, welche für den Einbau in den Strassendammbau oder in Bürgersteige ausgeführt werden. Im Inneren befinden sich Sammelschienen, an denen die einzelnen Leiter anzuschliessen sind. Die Kabelkästen müssen vollkommen dicht abgeschlossen sein, was durch besonders konstruierte Deckel, die zum Öffnen der Kästen bei Revisionen dienen, in ausreichendem Masse geschieht. Zwecks leichterer Bedienung der Verbindungen und Sicherungen in den Kabelkästen werden diese in der Regel nicht wie die Muffen mit Isoliermasse ausgegossen, sondern auf Hartgummi- oder Porzellanisolatoren angebracht. Oft werden sie aber mit Öl angefüllt, welches immerhin leicht zu entfernen ist.

41.
Kabelkästen
von Siemens
Broth.

Fig. 145¹⁾ zeigt einen Kabelkasten von SIEMENS Broth. London, dessen Kabeleinführungen genau so ausgeführt sind, wie dies bei den Muffen der gleichen Firma geschieht. Aus diesem Grunde ist der Kasten aber geteilt und wird, da diese Art der Einführung nicht genügend abdichtet, mit Kabelmasse ausgegossen, indessen nur so hoch, dass die Sammelringe mit den Anschlussschrauben darüber hinausragen und infolgedessen zugänglich bleiben. Diese Konstruktion enthält keine Sicherungen. Der in Fig. 262¹⁾ gezeichnete und für Dreileiteranlagen mit geerdetem Mittelleiter bestimmte Kasten enthält dagegen Sicherungen und ist unter Vermittelung der Schaltstücke A abschaltbar. Für den Fall, dass bei diesen Kästen eine Kabeleinführung nicht benutzt wird, ist dieselbe durch einen gut passenden Holzpfropf verschlossen, was unbedenklich ist, weil die Kabelmasse den Eintritt von Feuchtigkeit verhindert.

42.
Kabelkästen
der A. E.-G.

Die Kästen für Einfachkabel der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (Fig. 50) bestehen aus dem eigentlichen zur Aufnahme der Kabel bestimmten Kasten mit den Sammelschienen, der Verschlussglocke, dem Brunnenrahmen und der Abdeckplatte. Sie sind bis auf die Sammelschienen aus Gusseisen hergestellt. Diese bestehen aus verzinnemtem Messing. Die Aussparungen der Abdeckplatte werden mit Zement oder Asphalt ausgegossen.

In der Mitte des Kastens befinden sich übereinander angeordnet die Sammelschienen. Dieselben sind durch isolierte, eiserne Bolzen befestigt und durch Hartgummibuchsen voneinander getrennt. Die Sammelschienen haben

1) Siehe Tafel am Ende dieses Bandes.

Flansch zum Einklemmen des Kabels. Vorn ist es mit einer zylindrischen Ausbohrung zur Durchführung des Endverschlusses versehen. Ausserdem trägt es vorn einen viereckigen Flansch, mit welchem es an den Kabelkasten festgeschraubt wird. In der Mitte oben befindet sich das Eingussloch für die Füllmasse, welches wie bei den Muffen durch einen Gewindestöpsel verschliessbar ist.

Der Endverschluss hat die Form eines mehrfach abgesetzten Zylinders. Er ist in $\frac{2}{5}$ seiner Länge für die Montage auseinanderschraubbar. Zum leichteren Verständnis soll der vordere Teil mit den angefrästen Flächen „Kopf“, der hintere Teil „Schaft“ heissen. Die vordere Fläche dient als Kontaktfläche für die Sicherung, dieselbe wird durch eine Schraube mit Sechskantkopf aufgeschraubt. In das Gewindeloch der zweiten Fläche wird ein Hartgummistöpsel, welcher oben eine Prüfdrahtklemme trägt, eingesetzt. Zur Durchführung des Prüfdrahtes ist der Stöpsel der Länge nach durchbohrt. Bei Verwendung von Kabeln ohne Prüfdraht wird das Gewindeloch für den Hartgummistöpsel durch eine Schraube mit flachem Kopf verschlossen. Schaft und Kopf sind bis zum Gewindeloch des Hartgummistöpsels, teils wegen der Durchführung des Prüfdrahtes, teils zum Eintreiben des Dornes in die Kabelseele, der Länge nach durchbohrt.

Der hintere Teil der Durchbohrung des Schaftes ist, wie bei den Klemmen der Verbindungsmuffen, zur Einführung der Kabelseele nach der Mitte zu konisch erweitert.

Bei den Endverschlüssen stärkerer Querschnitte ist in die Innenwand der konischen Ausbohrung zur Führung des Prüfdrahtes eine Längsrille eingefräst. Bei schwächeren Querschnitten befindet sich diese Rille an der Aussenseite des Schaftes und endigt in einem schräg nach innen führendem Loch. Damit die beiden miteinander verschraubten Teile des Endverschlusses sich nicht lockern können, wird am Zusammenstoss derselben radial eine kleine Schraube eingeschraubt.

Für die Montage wird nun zunächst das einzuführende Kabelende wie bei den Verbindungsmuffen zubereitet und das freigemachte Ende der Kabelseele in die konische Ausbohrung des Endverschlusses eingeführt. Zur Befestigung wird ein konischer Dorn vom anderen Ende des Schaftes her in dieselbe eingetrieben. Darauf wird Kopf und Schaft des Endverschlusses miteinander verschraubt.

In die vordere Durchbohrung des Stutzensgehäuses wird nun eine Hartgummibuchse eingeführt, welche durch eine kleine, von oben einzuschraubende Spitzschraube festgehalten wird. Dann wird um das Ende der äusseren Jutelage eine Packung aus getränkter Hanfleinwand gewickelt, der zweiteilige konische Spannring darumgelegt und das Kabelende mit dem Endverschluss so weit in das Gehäuse eingeführt, dass der Ansatz des letzteren innen an die Hartgummibuchse anstösst und der Kopf dadurch auf die richtige Länge aus der Buchse hervorsteht. In dieser Lage wird der Spannring mit dem konisch ausgebohrten Flansch vermittelst vier Schraubenbolzen festgezogen. Alsdann wird der so montierte Stutzen unter Zwischenlage eines bei der Beschreibung der Kasten bereits erwähnten Gummiringes mit den dazu vorgesehenen Schraubenbolzen an den Kasten angeschraubt.

Darauf wird der Stutzen, nachdem vorher das Gehäuse leicht angewärmt worden ist, in der üblichen sorgfältigen Weise mit Füllmasse ausgegossen und durch den Gewindestöpsel verschlossen.

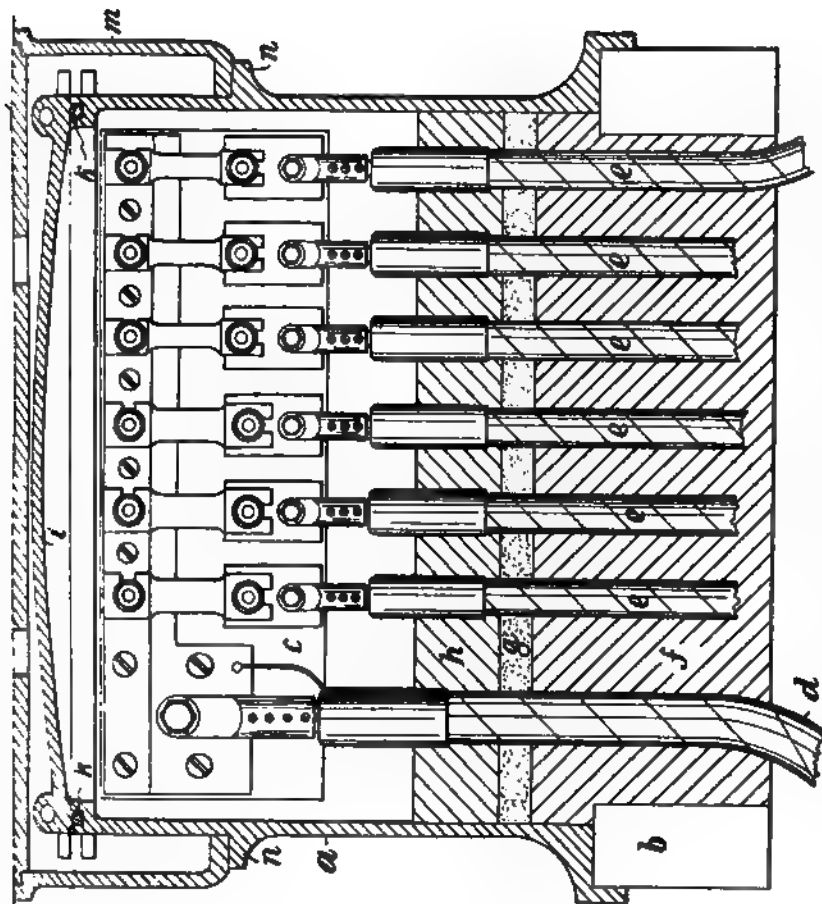
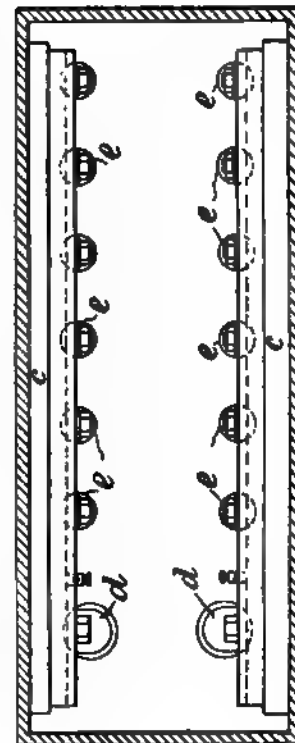


Fig. 53.



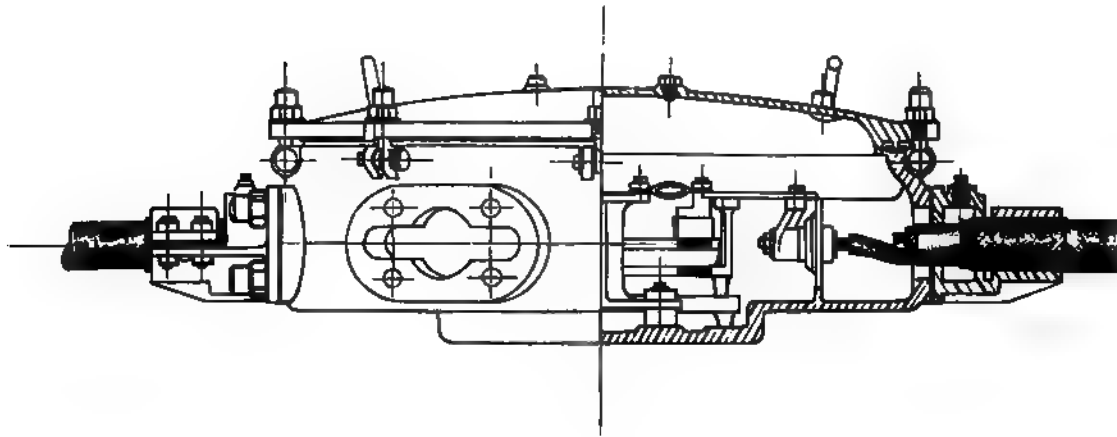


Fig. 54.

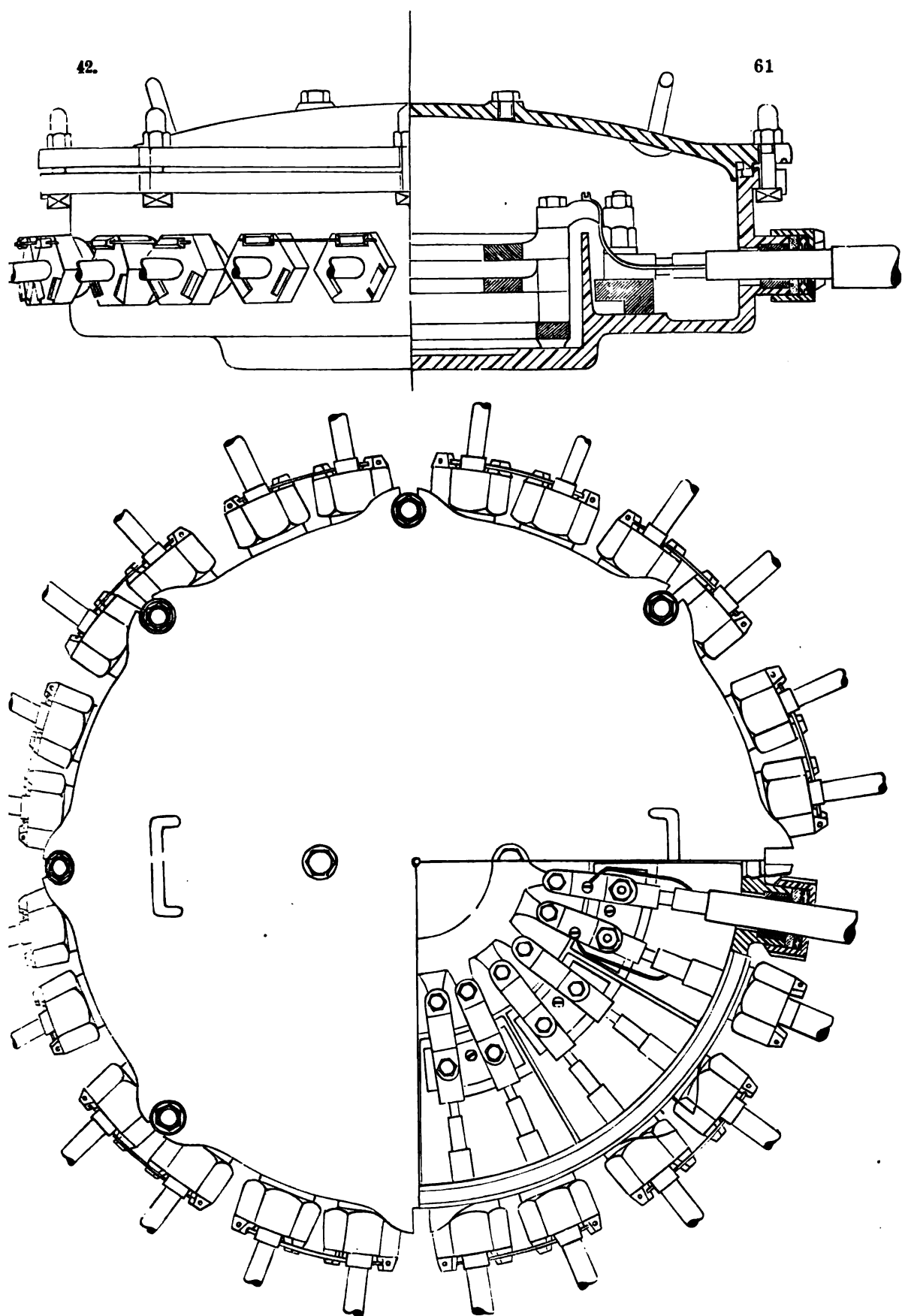


Fig. 55.

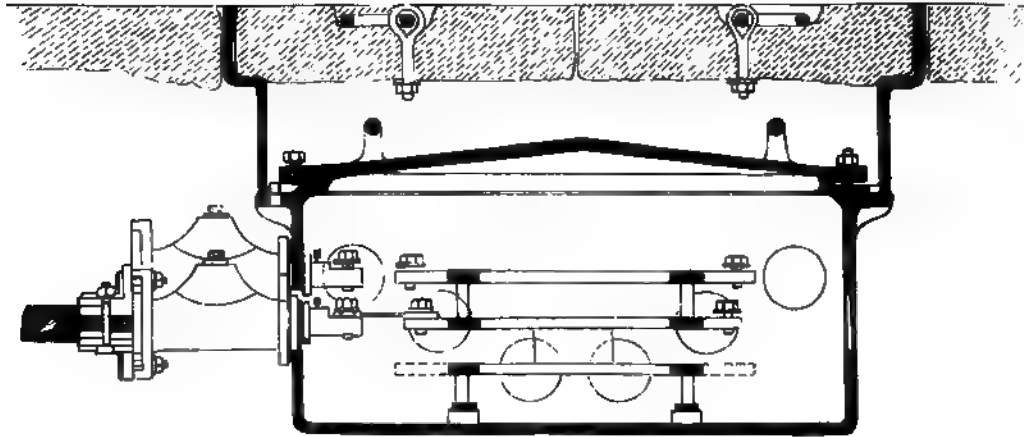


Fig. 56.



Fig. 57.

mit Steinen, Fig. 57 eine solche mit gusseisernem Rahmen und Abdeckplatte¹⁾, wie sie bei FELTEN & GUILLEAUME üblich ist.

44. Wie aus den vorstehenden Beschreibungen hervorgeht, wird Wert darauf
Ausschalt- gelegt, an gewissen Stellen die Kabel streckenweise abzuschalten. In der
bare Kabel- Regel erfolgt dies in den Kabelkästen unter Benutzung der Sicherungs-
armaturen. einsätze, während die verschiedenen Muffen, mit Ausnahme der Abzweig-
muffen mit Sicherung (Fig. 49), keine Konstruktionsteile zeigen, die ein Ab-
schalten gestatten. Bei den Kabelkästen ist es erforderlich, die mehr oder
weniger sicher befestigten Deckel zu öffnen, ehe es möglich ist, die Aus-
schaltvorrichtung zu bedienen. Mitunter, z. B. bei starkem Frost, kann diese
an und für sich einige Zeit beanspruchende Arbeit sehr zeitraubend werden.

Vielfach hat man daher darauf hingearbeitet, Armaturen zu schaffen, die von aussen bedient werden können, ohne dass es erforderlich wäre, sie zu öffnen. Erwähnt seien die folgenden Konstruktionen; da sie indessen praktische Erfolge bisher nicht zu verzeichnen hatten, sei nur kurz auf die in Frage kommende Litteratur hingewiesen.

Es sind dies die Schutzkästen von H. J. Moos²⁾, die ausschaltbaren und mit Sicherungen versehenen Muffen von J. SCHMIDT³⁾, die abschaltbaren T-Muffen der E.-A. vorm. SCHUCKERT & Co.⁴⁾ und schliesslich die abschaltbaren Muffen von H. EDMUNDS.⁵⁾

Statt dieser Anordnungen hat man, wie aus Fig. 58 hervorgeht, auch hinter die Muffen *B* in die Abzweigleitungen besondere Schaltkästen *A* gelegt⁶⁾, deren Deckel mit dem Pflaster abschneidet. Von dort werden die Leitungen in das Haus zur Sicherung *C* geführt.

Verbindungen an Drähten.

45. Die einfachste Verbindung zwischen zwei Leitern geschieht durch ein-
Feste Ver- faches Zusammenwürgen der Enden und Verlöten dieser Würgestelle. Diese
bindungen. Methode verwendet man bei Drähten bis 4 mm² (Fig. 59).

Eine andere Verbindungsart von dünnen Drähten zeigt Fig. 60. Die beiden Drähte werden so übereinandergelegt, dass zwischen den beiden



Fig. 59.



Fig. 60.

Umbiegestellen ein längeres Stück beider Drähte frei bleibt. Die beiden Endstücke werden so lang gewählt, dass sie nach ihrer Umwicklung genau bis zur Mitte reichen und dort zusammenpassen.

Bei Drähten über 4 mm² Querschnitt werden, wie Fig. 61a u. b zeigen, die beiden Drahtenden rechtwinkelig abgebogen, dann auf etwa 7—8 cm und zwar so nebeneinandergelegt, dass die Drahtenden nach aussen liegen, hierauf in dieser Lage mit einer Klemme oder Feilkloben zusammengehalten

1) Die Montage eines runden Kabelkastens zeigt Fig. 7 der ETZ 1901, S. 429.

2) E. A. 1902, S. 1902.

3) E. A. 1902, S. 1805, 1901. 1986.

4) E. A. 1902, S. 1962.

5) E. A. 1902, S. 2409.

6) MOMMERQUÉ, Contrôle des installations électriques, Paris 1904, Verlag von Béranger, Fig. 160.

und durch einen Bindendraht, welcher aus demselben Material wie der Leitungsdraht hergestellt ist, umwickelt. Wenn der Raum zwischen beiden Drahtenden ausgefüllt ist, wird die Verbindungsstelle verlötet.

Dazu müssen die beiden Drahtenden mit Glas- oder Schmirgelpapier sauber gereinigt werden, die Lötmasse muss die ganze Verbindungsstelle durchdringen.

Zum Löten dürfen keine Löt-
mittel verwendet
werden, welche
das Metall an-
greifen, also auf
keinen Fall Säure,
zweckmässig
kann Kolopho-
nium oder Stearin in Anwendung kommen.

Es ist vielfach Lötzinn in Röhren-
form hergestellt worden, welches gleich das Flussmittel (meistens Kolo-
phonium) enthält. Es hat sich ganz gut bewährt. Das beste Lötzinn be-
steht aus drei Teilen Zinn
und einem Teil Blei.

Um die Arbeit des Um-
wickelns zu ersparen, hat
man eine flache Hülse über
die beiden blank gemachten
Drähte geschoben und diese
an beiden Seiten umgebogen,
wie es Fig. 62 zeigt. Durch
die in der Abbildung sichtbare Öffnung wird dann flüssiges Zinn bzw.
Lötzinn eingefüllt.

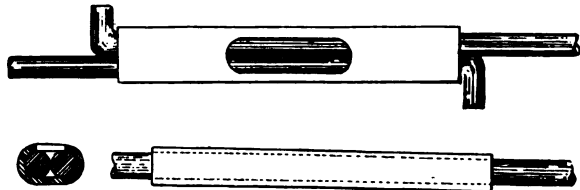


Fig. 62.

Die Lötarbeit wird teils mit dem LötKolben, teils mit der Lötlampe aus-
geführt, und zwar wird meist die letztere dem Kolben vorgezogen. Es ist
streng darauf zu achten, dass die Lötstelle sachgemäss hergestellt wird,
d. h. das Lot muss gleichmässig über die ganze Verbindung verteilt sein.
Sie darf nicht unvollkommen mit Lot überputzt werden, da dieses sonst
abspringt und die Verbindungsstelle durch Oxydation schadhaf wird. Ferner
darf man bei diesen Arbeiten nicht mit dem LötKolben oder der Stichflamme
über den Bund hinausgleiten, da hierdurch leicht der Draht selbst weich-
geglüht und so eine Stelle geschaffen werden kann, welche bei erster Ge-
legenheit reisst.

Als eine dem Verlöten gleichwertige Verbindungsart ist der Draht-
bund nach HEINRICH ARLT, dessen Fabrikation und Verkauf die Firma
Dr. SCHMIDMER & Co. in Nürnberg übernommen und die Patente des Herrn
ARLT erworben hat, anzusehen (Fig. 63). Diese Drahtverbindung wird ohne
Lötung mittels eines Bronzeröhrchens in der Weise hergestellt, dass man
letzteres über die zu verbindenden Drahtenden schiebt und das Ganze zu-
sammendreht. Zu diesem Zweck verwendet man am besten eine besonders
konstruierte Zange (Fig. 63 e), doch kann man auch gewöhnliche Zangen,
Feilkloben u. dergl. verwenden. Zweckmässig werden dann die Enden noch
zurückgebogen.

Die Bronzeröhren haben die folgenden Dimensionen:

für Leitungen von	1.5 mm \varnothing	Wandstärke	0.5 mm	Länge	80 mm
" " "	2.0 " "	" "	0.5 " "	" "	100 "
" " "	3.0 " "	" "	0.6 " "	" "	150 "
" " "	4.0 " "	" "	0.8 " "	" "	200 "
" " "	5.0 " "	" "	0.8 " "	" "	250 "

Bei Leitungen von grösseren Querschnitten (über 16 mm²), welche meistens aus mehreren Drähten bestehen, empfiehlt sich das in Fig. 64 dargestellte Verfahren. In reichlich bemessener Entfernung von den Leitungs-

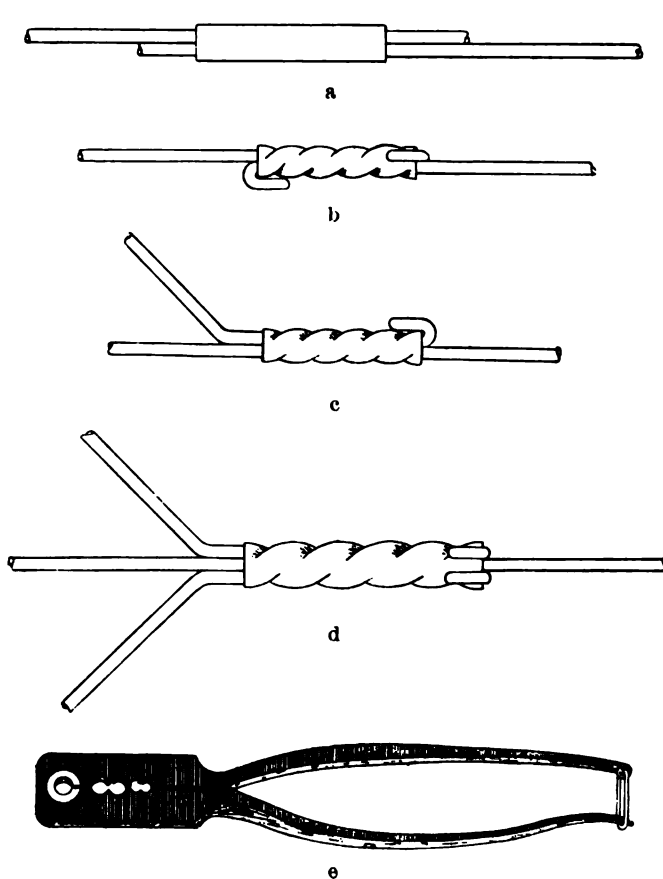


Fig. 63.



Fig. 64.

enden biegt man die Drähte der Decklage nach rückwärts um. Die Drähte der Grundform¹⁾ werden etwa 60 bis 100 mm vom Ende abgeschnitten, so dass sie kürzer als die oberen Drähte bleiben; die zurückgebogenen Enden der Deckdrähte werden sorgfältig mit Schmirgelleinen gereinigt. Dann nähert man die zu verbindenden beiden Leitungen einander so, dass die Schnittflächen der Kerndrähte sich möglichst berühren, biegt die Deckdrähte wieder nach vorn und steckt sie so durcheinander durch, dass immer ein Draht der einen Leitung zwischen zwei Drähten der anderen liegt. Endlich windet man

1) Vgl. Hdb. VI, S. 7.

die Deckdrähte jeder Leitung fest um die Kernlitze der anderen Leitung, wie aus der Zeichnung zu ersehen. Das Zusammenlöten der Drähte der Verbindungsstelle geschieht am besten in der Weise, dass man in die Zwischenräume kleine Zinnstücke steckt und auch das nötige säurefreie Lötwasser daran thut. Um ein Abfließen des Lötzinnes zu verhüten, umwickelt man die Verbindungsstelle mit etwa 1 mm dickem, verzinnnten Kupferdraht, den man gegen die Mitte etwas weitläufiger wickelt, um etwa noch verbleibende leere Räume später mit Zinn ausfüllen zu können.

Ähnlich wie die Verbindung zweier Leitungen können auch die Abzweigungen hergestellt werden. Handelt es sich um massive Drähte, so kann gut eine der in Fig. 61—63 gezeigten Arten Anwendung finden. Der abzweigende Draht kann aber auch, wie es Fig. 65 a zeigt, um die durchgehende Leitung gewickelt und dann verlötet werden. Sind beide Leiter litzenförmig, so wird

der abzweigende geteilt und die eine Hälfte rechts, die andere links um das Seil gelegt (Fig. 65 b). Soll von einer sehr starken Litze aus ein schwaches Seilchen abgehen, so findet die in Fig. 65 c gekennzeichnete Art Anwendung.

Die Lötung wird vielfach gern vermieden, hauptsächlich bei der Verlegung von Freileitungen und es werden statt dessen die Leitungen auf mechanischem Wege fest miteinander verbunden. Im Nachfolgenden seien einige dieser Konstruktionen beschrieben.

Die in Fig. 66 dargestellte Leitungsverbindung lässt sich für alle Sorten von Leitungen verwenden. Hauptsächlich dürfte diese Verbindungsart bei Aluminiumleitungen Anwendung finden, da das Löten solcher Leitungen mit Schwierigkeiten verbunden ist. Das Verbindungsstück hat die Form eines hohlen Doppelkegels, dessen Mantel an einer oder zwei sich gegenüberliegenden Stellen eine ovale Öffnung hat. Die beiden

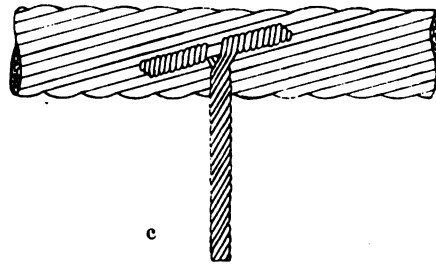
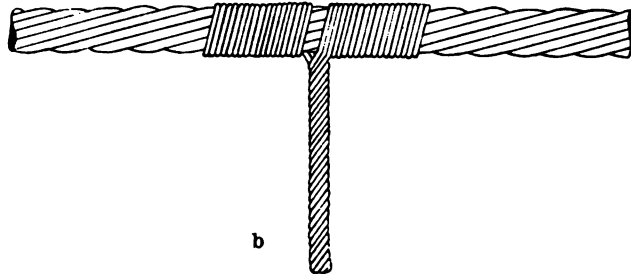
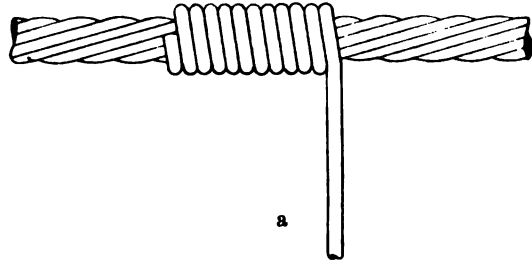


Fig. 65.

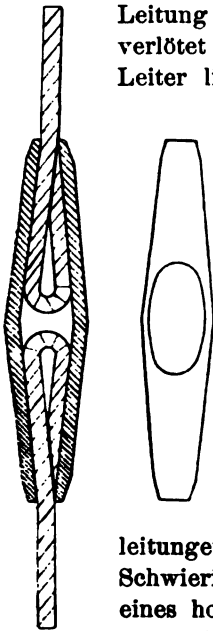


Fig. 66. Leitungen werden je auf einer Endöffnung hinein- und durch die

mittlere Mantelöffnung in den Doppelkegel gepresst. Durch starkes Ziehen an den Leitungen werden die hineingesteckten Leitungsenden stark zusammengedrückt. Zur Erzielung eines guten Kontaktes wird dann noch in die Mantelöffnung flüssiges Lot gegossen.

Von HOFMANN wird eine Verbindung elektrischer Leitungen durch Nietung angegeben, die darin besteht, dass die beiden zu verbindenden Drähte in eine flache, mit zwei Ausbuchtungen (Fig. 67) versehene Hülse aus nahtlosem Kupferrohr gesteckt werden. Im Mittelpunkt der kreisförmigen Ausbuchtung befindet sich in dem Verbindungsstück je eine Öffnung *B*, durch welche nunmehr ein Dorn *A* (Fig. 68) derart zwischen den beiden in die Hülse eingesteckten Leitungen hindurchgetrieben wird, dass sich die Leiter ebenfalls ausbiegen und dicht an die inneren Wandungen des Verbindungsstückes anlegen. In die hierdurch in der Mitte entstandenen Zwischenräume werden quer durch die Hülse gehende Nieten eingeführt, welche die Drähte in ihrer ausgebogenen Lage erhalten und deren Streckung verhindern. Der Kontakt wird einestells durch die Nieten, welche sich beim Hämmern stauchen und sich zwischen die Drähte einklemmen, andererseits durch die Hülse, an der die Drähte ausserordentlich fest anliegen, vermittelt. Zur Herstellung der Nietverbindung bedient man sich zweckmässig einer gusseisernen Grundplatte (Fig. 68), welche ausser zwei Löchern für das

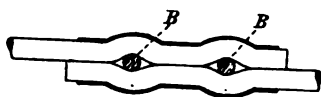


Fig. 67.

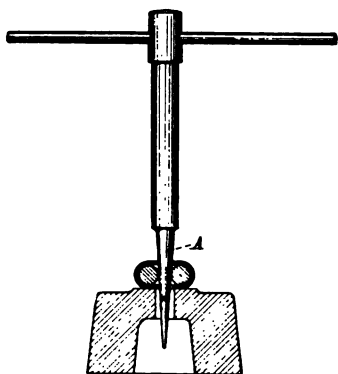


Fig. 68.

Durchtreiben des Dornes auch noch zwei halbkreisförmige Vertiefungen enthält, in welche die Nietköpfe beim Vernieten eingesetzt werden.

Zum Festlegen von Zweigleitungen an ein Hauptkabel bedient man sich der nachstehend beschriebenen Klammern: Ein in Form der Fig. 69 aus Blech gestanztes Stück Kupfer (oder anderes Metall) wird mit seinem Teil 1 zu einer runden Hülse *a* zusammengebracht, unter rechtwinkliger Abbiegung der als dann diametral sich gegenüberliegenden Streifen 2. Nunmehr werden die den letzteren anhängenden Stücke 3 zu Haken mit gerundetem Grund und parallel aufrechtstehenden Schenkeln umgebogen. Diese Schenkel *bc*, sowie die als obere Fortsetzung der Hülse *a* sich darstellenden, aus den Streifen 4 gebildeten Lappen *d* werden fest um das Hauptkabel gelegt, während die Hülse *a* zur Aufnahme der Seitenabzweigung bestimmt ist.

Die zur Bildung solcher Klammern erforderlichen Metallstücke sind ohne jeden Abfall, bzw. mit sehr geringem Materialverlust aus Blechstreifen auszustanzen, und zwar in der durch Fig. 69 dargestellten Weise für den Fall, dass die Durchmesser der Hauptleitung und der Abzweigungen gleichgross sind.

Die Verbindung von Leitungen ist nicht immer leicht auszuführen, zumal das Löten im Freien häufig grosse Schwierigkeiten bietet. Hauptsächlich gilt dies von grossen Querschnitten. Das Zinn fliesst nicht genügend durch, und es giebt kalte Lötstellen, die bei starkem Zug zerreißen. Bei sorgfältig ausgeführten Verbindungen ist zudem der Zeitaufwand ein sehr grosser. Um diesen Übelständen zu begegnen, wurde in neuerer Zeit ein kleines Maschinchen

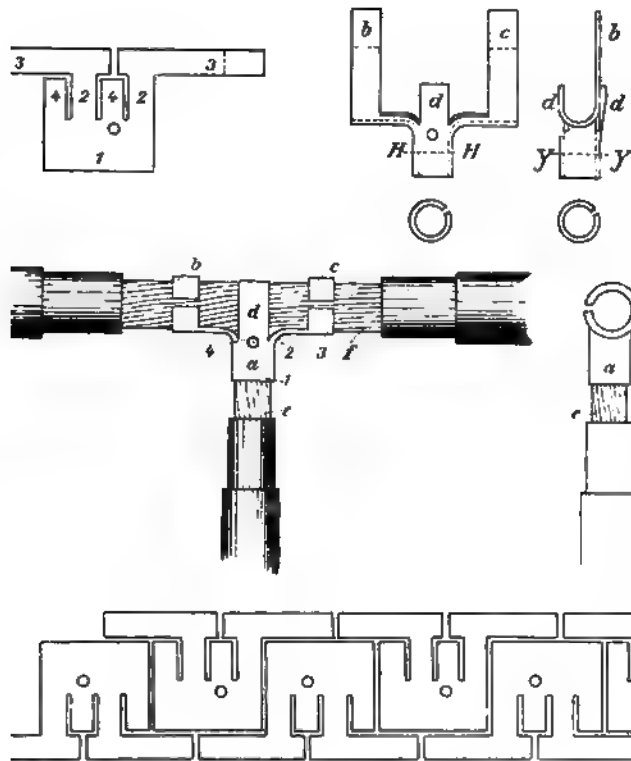


Fig. 69.

zustellen, werden diese mit dem Feilkloben zusammengeklemt, nachdem sie je nach der Länge der beabsichtigten Bewickelung übereinandergelegt sind.

Langenschnitt

konstruiert (Syst. HEYDE), auf welches wir in nachstehendem näher eingehen wollen.

Dasselbe, welches in Fig. 70 und ff. wiedergegeben ist, besteht aus dem festen Stück *c*, das mit dem Handgriff *f* versehen ist, dem rotierenden Körper *b* mit dem Ansatz zur Aufnahme der Drahtspulen, der Zange *a* zur Aufnahme der zu verbindenden Drähte und der Drahtspule *e*. Einen recht anschaulichen Überblick gewährt Fig. 71, da aus

dieser die Handhabung deutlich ersichtlich ist.

Um eine Verbindung zweier Leiterenden nach dieser Methode her-

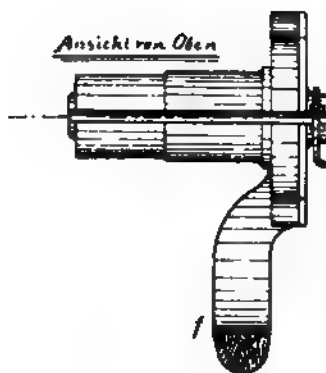


Fig. 70.

Fig. 71.

dieses so zu einem festen Stück gepresst wird, dass ein Teil des rohrförmigen Stückes als Schutzhülse für die Litze erhalten bleibt, während das Ende der Litze nahezu achsial durch den Kopf hindurchragt; schliesslich wird in das Kupferstück ein Keilloch so eingepresst, dass der Pressdruck entlang der Litze geht und hierdurch mit dem überschüssigen Metall etwa vorhandene Luftteilchen nach unten zu herausgedrückt werden. Der im Kopf verbleibende Teil der Litze wird innig mit dem Metall der Kopfes verschmolzen und somit ein Anschlussstück, wie es Fig. 80 zeigt, geschaffen, welches mit der anschliessenden Leitung aus einem Stück besteht.

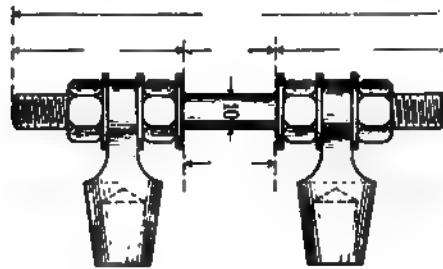


Fig. 77.



Fig. 78.

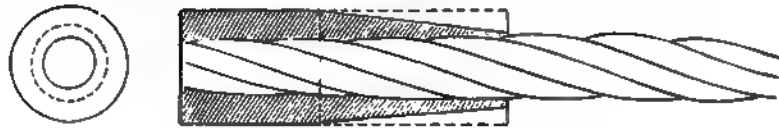


Fig. 80.

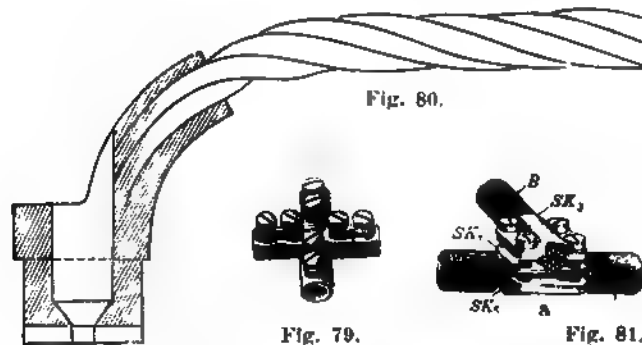


Fig. 79.



Fig. 81.

Die SIEMENS-SCHUCKERT-Werke verwenden Abzweigklemmen (Fig. 81), die aus zwei Schellen mit zwischenliegender Platte SK_1 bestehen, die durch vier Schrauben verbunden sind. Zwischen untere Schelle und Platte wird die Hauptleitung, in der Figur eine Litze, zwischen Platte und obere Schelle die Abzweigleitung B gesteckt und das Ganze dann durch Anziehen der vier Schrauben zusammengepresst. Besteht die Hauptleitung nicht aus einer runden Leitung, sondern aus einer Schiene — bei Verwendung einer isolierten Leitung wird die Isolierung genau in der Breite der Klemmen entfernt —, so wird statt der in der Figur sichtbaren unteren runden Platte eine andere flache verwendet. Überhaupt gestattet diese Klemme bei geeigneter Wahl der Einzelteile eine universelle Anwendung.

wird dann in der Abzweigvorrichtung nur ein Draht dieser Leitung durchgeschnitten. Die so entstandenen Enden werden mit den beiden Doppelklemmen verbunden; dadurch wird die eine Drahhälfte zur Zuleitung zum Schalter, während die andere Hälfte als Rückleitung von dem Stromverbraucher zur Abzweigvorrichtung dient. Es ist dabei gleichgültig, ob vom Schalter eine oder mehrere Leitungen nach dem Stromverbraucher geführt werden.

Die SIEMENS-SCHUCKERT-Werke haben ihre Abzweigdosen nach Fig. 87 ausgebildet; bei diesen liegen die Kreuzungen in verschiedenen Ebenen. Die Abbildungen zeigen gleichzeitig die gebräuchlichsten Anwendungsformen. Die Dose wird nach der Montage der Leitungen durch einen Porzellandeckel

Verbindungsstelle



Fig. 87.

geschlossen. Der Wert dieser Konstruktion ist am besten daran zu erkennen, dass sie von den verschiedensten Fabrikanten unberechtigterweise nachgebaut wird.

Eine Abzweigklemme der Elektrizitäts-Gesellschaft RICHTER, Dr. WEIL & Co. besteht aus einigen normalen Elementen, mit deren Hilfe alle vorkommenden Kombinationen zusammengestellt werden können. Fig. 88 zeigt, wie eine gewöhnliche Abzweigstelle hergestellt wird. Um die Abzweigstelle von Zug zu entlasten, legt man eine Schleife um den Hals des Deckels und befestigt dieselbe mit Bindendraht. Soll eine doppelpolige Leitung durch eine derartige Vorrichtung verbunden werden, so werden zunächst die Leitungsenden unter die Klemme gelegt und diese in den in Fig. 88 gezeichneten Sockel eingebettet. Hierauf wird ein Porzellanzwischenstück aufgelegt und dann die Verbindung mit der zweiten Leitung mit einer gleichen Klemme hergestellt. Den Schluss bildet dann der Deckel. Erforderlichenfalls können beliebig viele derartige Abzweigstellen übereinanderggebaut werden.

Ernster machte sich SÖMMERINGS Freund Baron SCHILLING VON CAN an die Herstellung eines elektrischen Leitungsseiles, mit welchem er feuchte Erde und Wasser telegraphierte und im Jahre 1812 auch Spreng durch das Wasser ausführte. Grössere Versuche mit einer im Wasser senkten Telegraphenleitung machte SCHILLING im Jahre 1836, und diese beinahe schon damals zur Anlage eines unterseeischen Telegraphen für

In dem Masse, als sich in der nun folgenden Zeitepoche die Vorkämpfer mit der elektrischen Telegraphie mehrten, trachtete man auch, die elektrischen Leitungen zu verbessern, und der Gedanke, die Leitungen unterirdisch zu verlegen, begann um so mehr festen Fuss zu fassen, als man mit den damaligen wenigen oberirdischen Leitungen infolge der schädlichen Witterungseinflüsse und der äusserst mangelhaft isolierten Stützpunkte keine Erfahrungen gemacht hatte. — Bessere Erfolge erhoffte man sich von einer unterirdischen Leitung, und es wurden zahlreiche Versuche angestellt, anfangs grösstenteils auf das Einziehen der Drähte in isolierende Thon- oder Glasröhren hinausliefen.“

In seinem „Lehrbuche des Galvanismus und der Elektrochemie“ (1829, S. 269) spricht Dr. GUSTAV FECHNER, anknüpfend an die Versuche von BASSÉ, über eine unterirdische Leitung, welche, aus überspannten Drahten bestehend, ein nicht sehr kostspieliges Mittel zur Beförderung von Nachrichten abgeben würde.

Der amerikanische Historienmaler, Professor SAMUEL FINLEY MORSE, der berühmte Erfinder des in der Praxis so vielfach angewandten elektromagnetischen Telegraphen, schlug Ende September 1837 gleichfalls Stangenleitungen durch die Luft vor und gleichartig unterirdische Leitungen, welche letztere er in eisernen Röhren, unter Umständen aber auch in Thonröhren, verlegen wollte.

In England wurden die ersten isolierten Fernleitungen von WHEATSTONE und COOKE thatsächlich in eiserne Röhren eingeschlossen und diese in die Erde eingegraben, teils auf niedrigen Pfosten über der Erde. Der dabei verwendete Kupferdraht wurde mit Baumwolle umspunnen und sorgfältig gefirnist. Aus ökonomischen Gründen, behufs vollkommener Isolierung und besserer Überwachung, verliess man jedoch dieses Verfahren wieder und ging zum Bau von Luftleitungen über.

In den folgenden Jahren tauchten abermals Vorschläge für unterseeische Telegraphenleitungen auf. Die erste Leitung unter Wasser wurde von Dr. O'SHAUGHNESSY¹⁾ in Hindostan ausgeführt zu haben, welcher im Jahre 1839 in der Nähe von Calcutta eine 21 Meilen lange Versuchslinie anlegte, in dieser eine 7000 Fuss lange Flussleitung herstellte. Ferner legte WHEATSTONE bereits 1840 beim englischen Unterhause die Versenkung eines Telegraphenseiles in den Kanal an, um Dover mit Calais telegraphisch zu verbinden, welcher Vorschlag allerdings erst in den Jahren 1850 zur Ausführung gelangte, und im August 1843 wurde von MORSE ein Brief an den Schatzsekretär der Vereinigten Staaten von Nordamerika über die Herstellung einer unterseeischen Telegraphenleitung zwischen Amerika und Europa beantragt.²⁾

1) HIGHTON, Electric telegraph, S. 161.

2) DELAMARCHE, Elemente der unterseeischen Telegraphie, übersetzt von C. MANN, Berlin 1859, S. 68; vgl. auch L. FÖRSTERS „Allgemeine Bauzeitung“, 18. S. 235 (Geschichte des elektrischen Telegraphen).

Isolator (vgl. Freileitungen) der Entweichung des elektrischen Stromes keinen genügenden Widerstand bot. Erst als bessere Isolatorentypen zur Einführung gelangten, wurde die oberirdische Leitung ein betriebssicheres Mittel zur Übertragung der elektrischen Energie. Als grosser Mangel stellte es sich noch heraus, dass die verwendeten Eisenleitungen sehr stark rosteten, mannigfache Versuche mit Überzügen von Asphaltlack oder Leinöl blieben resultatlos. Erst 20 Jahre nach Einführung der oberirdischen Leitungen wurde in der Verzinkung des Eisendrahtes ein wirksames Mittel gegen das Rosten gefunden. Bei der allgemeinen Einführung oberirdischer Leitungen konnte es in grossen Verkehrszentren naturgemäss nicht ausbleiben, dass die Anzahl der Leitungen ins Ungemessene wuchs, wodurch Unfälle vorkamen. In New-York wurden daher im Jahre 1890 alle oberirdischen Leitungen verboten.

Die unterirdische Verlegung der Leitungen gewann erst Bedeutung und Ausdehnung, nachdem WERNER SIEMENS das Bleikabel erfunden und seine Fabrikation zu grosser Vollendung gebracht hatte.¹⁾

Die Verlegung der Kabel.

51. Die sachgemässe Verlegung von Kabeln erfordert in erster Linie eine
 Allgemeines. genaue Kenntnis des Kabels selbst und der am Ort der Verlegung herrschenden Verhältnisse. Die Verlegung muss ausserordentlich gewissenhaft und sorgfältig erfolgen, da hiervon ein gutes Arbeiten des verlegten Kabels abhängig ist.

Nach den elektrischen und örtlichen Verhältnissen ist die Konstruktion des Kabels gewählt worden, jedoch muss während der Verlegung noch nachgeprüft werden, ob nicht durch die Art der Verlegung noch ein weiterer Schutz gegen chemische oder mechanische Verletzungen geschaffen werden muss. Während schon die Verlegung der Kabel selbst grosse Umsicht erfordert, gilt dies in erhöhtem Masse von der Herstellung der Verbindungsstellen, die naturgemäss als schwache Stellen der Kabelstrecken aufzufassen sind. Wird die nötige Sorgfalt ausser Acht gelassen, so wird das Kabel entweder schon bei der Inbetriebsetzung durchschlagen, oder nach kurzem Gebrauch so verlieren, dass die Betriebssicherheit nicht mehr gewährleistet ist.

Aber nicht allein durch direkte bzw. mechanische Beschädigungen werden Kabelfehler²⁾ hervorgerufen, sondern aussergewöhnliche Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse, das Vorhandensein eines salzhaltigen Bodens etc. können die ungünstigsten Wirkungen auf das Kabel ausüben. Treten die vorgenannten Mängel auf, so ist die Einbettung der Kabel in eine reichliche Menge reinen Sandes das wirksamste Mittel, oder es muss das eine oder andere der später beschriebenen besonders sicheren Verlegungssysteme zur Anwendung kommen.

Kabeldefekte können aber auch durch Montagefehler, z. B. mangelhafte Herstellung einer Kabelverbindungsstelle, fehlerhafte Montage einer Abzweig- oder Verbindungsmuffe, durch ein totgelegtes Kabelende, durch eine schlecht isolierte Anschlussleitung und schliesslich auch durch unsolide Montage eines Kasteneinführungsstützens entstehen.

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 90.

2) Näheres siehe Entstehung der Isolationsfehler. Hdb. VI, 2.

52.
Transport
der Kabel.

Mit wachsendem Querschnitt sinkt die Fabrikationslänge¹⁾ der Kabel; dieselben werden daher nicht in bestimmten Längen, sondern in bestimmtem Gewicht versandt. Die Kabelfabriken liefern die Kabel in solcher Verpackung, dass der Transport möglichst erleichtert wird. Bei einigermaßen grösseren Längen werden die früher beschriebenen²⁾ Kabeltrommeln verwendet, sonst werden die Kabel in Ringe gelegt und mit Stroh verpackt. Man setze die Kabel, wenn sie nicht gleich verlegt werden können, nicht unnötigerweise lange den direkten Sonnenstrahlen aus, sondern bedecke sie mit Stroh. Auch vor den Einwirkungen zu starker Kälte müssen sie bewahrt werden. In gefrorenem Zustande ist die Verlegung auf jeden Fall unzulässig.³⁾

Wenn irgend möglich, verwende man zum Abladen einen Kran (eventl. einen Dreibaum, wie Fig. 90 zeigt). In diesem Fall wird durch die gebohrte Achse des Haspels eine Welle gesteckt und an dieser die Hebetaue befestigt. Sind Ringe zu heben, so verwende man breite Gurtbänder, um jede Beschädigung des Kabels auszuschliessen. Da aber am Orte der Verlegung häufig Krane nicht zur Verfügung stehen, ihre Verwendung aber von grösster Bedeutung ist, so haben die Kabelwerke selbst besondere Transport- und Hebmittel im Gebrauch. Es sind dies besonders zweckmässige, leicht transportable Kabelkrane, Kabeltransportwagen und drehbare Verlegungsscheiben. Findet der Transport zur Verlegungsstelle auf einem gewöhnlichen Rollwagen statt, so müssen die Trommeln gut unterkeilt und die Keile festgenagelt werden; beim Abrollen der Trommeln vom Wagen muss durch ein oder zwei um den Umfang derselben geschlungene Seile die Geschwindigkeit der ablaufenden Trommel auf ein Minimum begrenzt werden.

Weit vorteilhafter ist der Transport auf einem besonderen Kabeltransportwagen, von denen zwei in den Abbildungen⁴⁾ 91 und 92 wiedergegeben werden. Der erstere ist nur für Trommeln beschränkteren Durchmessers bestimmt, während der Wagen nach Fig. 92 solche verschiedener Grösse aufnehmen kann.

Die Trommel wird mit Hilfe der Winde k (Fig. 91) und des um ihren Umfang geschlungenen Seiles T auf den Wagen gezogen, wobei die herabgelassene Rückwand s als Brücke dient. Durch die hohle Achse wird ein Eisenstab gesteckt, der sich auf den abgeschrägten Bordwänden wälzt, bis er den Endpunkt L erreicht. Hier wird die Welle durch ein Überwurfstück festgehalten.

Auf den Wagen nach Fig. 92 wird die Trommel in ähnlicher Weise aufgebracht, ihre Achse wird aber hier dadurch festgelegt, dass die um ein Scharnier S drehbaren und mit Lagern L versehenen Schienen mit Hilfe von Schraubwinden W gehoben werden.

Bei beiden Wagen wird eine Lagerung der Trommel erreicht, welche sie zu drehen erlaubt. Dieser Umstand kommt bei der Verlegung sehr zu statten.⁵⁾

Zu beachten ist, dass die auf den Kabeltrommeln oder Ringen aufgeschriebenen Vermerke, die sich auf Länge und Querschnitt beziehen, nicht

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 108 u. 172.

2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 108.

3) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 90.

4) HUGO WIETZ, Die isolierten elektrischen Leitungsdrähte und Kabel, S. 112 u. 113.

5) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 83.

vorhanden ist, die Trommeln abzuladen und auf die eine der folgenden Arten drehbar zu lagern.

Man wende das Prinzip an, welches bei den Kabelwagen (Fig. 91 u. 92) zur Geltung kommt, indem man durch einige starke Balken und geeignete Unterlagen eine schiefe Ebene herstellt, auf welche die Trommel so gerollt wird, dass sie schliesslich an dem durchgesteckten Eisenstab hängt oder man lagere die Trommel auf zwei Böcke der in Fig. 93 skizzierten Art. Am einfachsten geschieht dies, indem man die Trommel auf einige Ziegelsteine rollt, die Böcke unter die Welle stellt und dann die Steine zerschlägt.

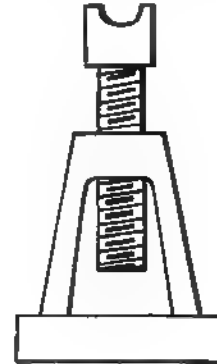


Fig. 93.

Fig. 94.

Sehr bequem sind anstatt der vorerwähnten Böcke die bekannten eisernen Schraubspindeln (Fig. 94). Diese werden so tief eingestellt, dass man die Welle bequem fassen und durch Drehung der Spindel die Trommel heben kann.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Kabelverlegung bieten die Verlegungs-scheiben, die auf Fig. 90 in zwei Exemplaren zu erkennen sind. Es sind dies kräftige, zweirädrige Karren, die eine um einen Mittelzapfen drehbare Scheibe haben. Auf diese wird der Kabelring flach gelegt und die Scheibe beim Ablaufen des Kabels langsam nachgedreht, sodass das Kabel nie Schleifen bilden kann.

54.
Die Anord-
nung der
Kabel im
Erdreich.

Die Zusammenlegung grösserer Mengen von Kabeln hat gewisse Nachteile. Treten in dem einen Kabelstrang Störungen auf, so kann es vorkommen, dass andere, an und für sich an dem betreffenden Defekt unbeteiligte Kabel, in Mitleidenschaft gezogen werden. Insbesondere wird dies bei Kurzschlüssen und dem Herausbrennen eines Kabelstückes stets der Fall sein, wenn die Kabel dicht aneinander liegen.

Man wird daher in erster Linie den Hauptleitungen erhöhte Aufmerksamkeit schenken und sie eventuell in besonderen Kanälen oder in einer gewissen Entfernung von den übrigen Leitungen verlegen. Die gleiche Trennung wähle man bei der gleichzeitigen Verlegung von Hoch- und Niederspannungskabeln oder von Stark- und Schwachstromkabeln (vgl. Fig. 95).

Fig. 101 stellt die Verlegung von mehreren Kabeln mit verschiedenen Spannungen oder zu verschiedenen Zwecken in drei nebeneinander liegenden gemauerten Kanälen dar. Im mittleren Kanal sind die Speisekabel gedacht, in den beiden äusseren die Strassenbeleuchtungs- und Niederspannungs-Verteilungskabel. Abzweigungen werden nur an den Kabeln in den äusseren Kanälen ausgeführt.

nur mit geringem Schutz gegen mechanische Angriffe, oder sie werden in besondere Rohrsysteme, Kanäle und dergl. eingezogen. Die Verlegung der Kabel im Inneren der Centralen wird besonders behandelt werden müssen.¹⁾

55.
Der Kabel-
graben.

Der Kabelgraben wird so tief ausgehoben,²⁾ dass die Kabel dauernd frostfrei liegen. Als normale Tiefe kann man etwa 60—75 cm annehmen. Sollten Guttaperchakabel in Frage kommen, so wählt man besser eine Verlegungstiefe von 1 m, um das Kabel gegen den Einfluss der Sonnenwärme zu schützen.

Die Breite des Grabens beträgt mindestens 35 cm, wenn 2—3 Kabel verlegt werden sollen. Für eine grössere Anzahl muss er entsprechend breiter hergestellt werden.

Nach dem Ausheben des Erdreichs wird die Sohle des Grabens geebnet, von Steinen, Holz und allen Substanzen gesäubert, die, in Fäulnis übergehend, die Kabelhülle chemisch beeinflussen könnten. In besonders unreinem Erdreich wird dies nicht ohne weiteres möglich sein und man zieht es dann vor, in den Graben zunächst eine Schicht reinen Sandes zu schütten, die 10—15 cm hoch sein muss.

Die Nähe von Bäumen bietet für die Anlegung eines Kabelgrabens stets Schwierigkeiten und es ist vorteilhaft, sie zu meiden. Man wähle die Kabelstrecke aus diesem Grunde ausserhalb der Ortschaften möglichst in der Mitte der Strasse. Im Inneren der Städte kommen andere Gesichtspunkte zur Geltung, hier muss auf den Verkehr und die mannigfachen Rohrleitungen u. s. w. besonders Rücksicht genommen werden. Man verlegt daher in diesem Fall die Starkstromkabel meistens am Rande der Bürgersteige. Wie wichtig eine Einigung der einzelnen Instanzen bezüglich des einzuschlagenden Weges ist, zeigt Fig. 96, der von KALLMANN³⁾ gezeichnete Querschnitt einer Berliner Strasse, aus welchem ersichtlich, dass die 4 m breiten Bürgersteige zur Verlegung aller nur denkbaren Leitungen herangezogen werden.

Erscheinen im Graben Hindernisse, so ist es notwendig, das Kabel unter dieselben zu verlegen, also den Graben so tief zu legen, dass auch die zum Schutze des Kabels etwa erforderlichen Abdeckmittel noch unter das Hindernis zu liegen kommen, und zwar geschieht dies, weil an einem Kabel viel seltener gearbeitet wird, als an einer Rohrleitung. Müsste der Graben jedoch infolge hindernder Gas- oder Wasserrohre, gemauerter Abwässerkanäle, Cementrohre u. s. w. tiefer als 2 m aufgeworfen werden, so wird man ausnahmsweise das Kabel über dem Hindernis verlegen.

An Strassenkreuzungen ist auf die Aufrechterhaltung des Verkehrs Rücksicht zu nehmen. Die Übergänge sind deshalb so lange wie möglich unberührt zu lassen und werden erst unmittelbar vor Anrücken der mit der Legung betrauten Arbeiter ausgehoben und der Graben dann durch Notbrücken überbrückt. Bei Unterführung von Geleisen verlegt man das Kabel mindestens 1 m tief und zieht es in eiserne Rohre ein. Alle Geleise müssen möglichst rechtwinklig gekreuzt werden.

56.
Das Ver-
legen.

Eine richtige Verteilung der vorhandenen Arbeitskräfte längs der ganzen Kabelstrecke ist in erster Linie erforderlich und zwar wird man die sachkundigen Handwerker an das Kabel selbst stellen, während man eine Arbeiter-

1) Vgl. Hdb. VI, 2: Verlegung der Leitungen in Centralen.

2) Es ist versucht worden, lange Kabelgräben mit Hilfe eines Pfluges aufzuwerfen; vgl. Technische Rundschau 1902, S. 286.

3) ETZ 1895, S. 211.

Fig. 96.



gruppe zum Grabenausheben, eine andere zur Kabellegung, eine weitere zum Zuwerfen des Grabens und die letzte zum Wiederherstellen der Strassenoberfläche verwendet. Unbedingt erforderlich ist es natürlich, wesentliche Biegungen des Kabels zu vermeiden und auch beim Verlegen desselben unter ein Hindernis hindurch sanftes Gefälle und Steigung des Erdbodens herzustellen, da sich sonst das Kabel durchbiegen würde oder äusserem Druck und Zerrungen ausgesetzt wäre. Einem Kabel scharfe Biegungen oder Knicke, z. B. bei den Verlegungsarbeiten, zuzumuten, ist ganz besonders schädlich für dasselbe und man wird das Verlegungspersonal eingehend instruieren müssen, um Schaden zu vermeiden.

In günstigen Fällen, wenn keine Hindernisse im Wege stehen, kann das Kabel vom Kabelwagen direkt in den Graben eingelegt werden.¹⁾ In anderen Fällen wird man das Kabel erst neben den Graben legen müssen, um es erst nach dem Auslegen auf die Sohle des Grabens zu bringen.

Beim Ziehen des Kabels verteile man die Arbeiter je nach Schwere des Kabels in Abständen von 5—10 m (vgl. Fig. 90). In Kurven und bei Hindernissen, wie Laternen, Bäumen u. s. w. müssen die Leute in geringeren Abständen aufgestellt werden.

Bei Verwendung ungeübten Personals hat man besonders vorsichtig zu sein. Die Arbeiter nehmen das Kabel gern auf die Schulter oder stehen in zu grossen Abständen, so dass es an diesen Stellen zu stark gebogen wird.

Um die Arbeit zu erleichtern, verteilt man im Kabelgraben in Entfernungen von 3—5 m Kabelrollen, wodurch einige Arbeitskräfte erspart und die Kabel bedeutend geschont werden. Derartige Gleitrollen werden aus Eichenholz hergestellt, sind an den Stirnseiten mit Eisen armiert und haben eine stabile, gewöhnlich mit Eisen armierte Grundplatte, sowie eine kräftige schmiedeeiserne Achse.

Ein Zugstrick, welcher um das Kabel geschlungen und in handlicher Höhe mit einem Querholz versehen ist, welches je einem oder zwei der ziehenden Arbeiter als Handhabe dient, ist ebenfalls ein gutes Hilfsmittel und sollte stets angewendet werden.

Ist das Kabel eingelegt, so beginnt das Ausrichten desselben (vgl. Fig. 97 und 100), und zwar, wenn mehrere Kabel zusammenliegen, bei jedem einzelnen besonders. Ist Platz genug vorhanden, so werden die Kabel in einem gewissen Abstand voneinander verlegt, um Muffen ohne Richtungsänderung des Kabels einbauen zu können (Fig. 100). Bei grösserer Anzahl der Kabel ist dies nicht möglich, die Muffen müssen dann umgangen werden (Fig. 97).

Sehr wichtig ist es, die Kabel so zu kennzeichnen, dass man sie später erkennen kann, ohne sie besonders zu prüfen. Es geschieht dies durch Umlegen von Bleistreifen um das Kabel, in welche die erforderlichen Daten eingeschlagen sind. Die letzterwähnte Figur lässt diese Anordnung deutlich erkennen. Vor dem eigentlichen Zudecken durch Maurer- oder andere Schutzarbeiten hat der Bauleiter sich noch einmal persönlich von der sachgemässen Ausführung der Arbeit zu überzeugen, worauf der eine Teil der Arbeiter den Graben zuschüttet und feststampft, während der andere die Strassenoberfläche wiederherstellt.²⁾

1) Um das Verlegen zu beschleunigen, ist versucht worden, einen Dampfwagen zu Hilfe zu nehmen. The Electrician, London 1904, S. 987.

2) Vgl. auch ETZ 1891, S. 86.

Diese Art der Abdeckung ist aus Fig. 98 erkenntlich. Ist nur ein Kabel zu schützen, so wird es ausreichen, die Ziegelsteine in ihrer Längsrichtung zu verlegen, bei mehreren Kabeln wird der Stein quer oder, wenn einer nicht mehr ausreicht, so viele nebeneinander gelegt, dass die Abdeckung die Kabel immer nach beiden Seiten überragt.

Nicht immer kann dieser Schutz als genügend angesehen werden, z. B. dann nicht, wenn Verletzungen von der Seite her zu erwarten sind. Vielfach werden dann die Schutzsteine in der in Fig. 99 wiedergegebenen Form angeordnet. Hierdurch wird aber auch die dreifache Anzahl von Steinen erforderlich. Einfacher ist es, besonders zur Abdeckung hergestellte Steine zu verwenden, die dann sicherer sind, weil die seitlichen Fugen ganz wegfallen. So zeigt Fig. 100 die Abdeckung von Kabeln mit halbrunden Ziegeln. Auch die in Fig. 103 gezeigten Normalkabelsteine können halbiert entsprechende Verwendung finden.

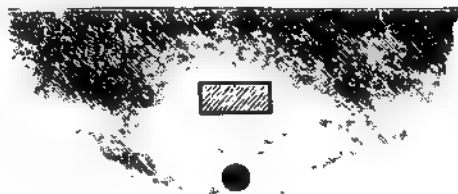


Fig. 98.

Fig. 99.

In Kurven genügt eine einfache Abdeckung nicht, da an ihrem äusseren Rande Fugen entstehen; an diesen Stellen werden dann zwei Ziegelschichten übereinander gelegt, und zwar so, dass die obere Reihe die Fugen der unteren überdeckt.

Keilförmige Steine zu verwenden oder gewöhnliche Steine keilförmig zuzuhauen wird unnötig teuer.

§1.
Schutz
durch ge-
mauerte
Kanäle.

Von der Abdeckung mit einzelnen Ziegelsteinen zum gemauerten Kanal ist nur ein kleiner Schritt, da naturgemäss das Bestreben besteht, die Ziegelsteine gegen eine Lagenveränderung zu schützen (siehe Fig. 101).

Der Kabelkanal wird in der Regel so hergestellt, dass mehrere Steine ausgelegt, mit Mörtel verbunden und dann einige Steine als seitliche Wände aufgeführt werden. Die Kabel werden eingelegt, der Kanal mit Sand gefüllt und oben noch mit Ziegelsteinen abgedeckt.

An den Stellen, wo Abzweigungen vorgenommen werden sollen, wird ein gemauerter Schacht angelegt.

der einzelnen Steine $25 \times 14 \times 14$ cm, mit der Länge und Breite, sowie der doppelten Stärke unserer gewöhnlichen Mauersteine übereinstimmen, daher der Name Normalkabelsteine. Die lichte Weite ist 10 cm, so dass also die geringste Wandstärke 2 cm beträgt. Die Spaltung des Steines erfolgt in der Mitte und ist hierauf bei der Fabrikation Rücksicht genommen.

Fig. 104.

Bei der Verlegung bzw. dem Vermauern dieser Kabelsteine kommt es darauf an, dass die Innenflächen der einzelnen Kanäle genau fluchtrecht und gerade verlegt werden.

Das Ausrichten dieser wie auch der später beschriebenen ähnlichen Konstruktionen erfolgt auf die nachstehend beschriebene Weise:

Nachdem die Baugrube ausgehoben und die Sohle planiert ist, werden die Steine an den Seiten des Grabens verteilt, gespalten und die untere Hälfte in Sand oder Cementmörtel auf die Sohle gebettet. Zum Ausrichten der so verlegten unteren Hälften der Steine bedient man sich einer runden, der Lochung des Steines gegenüber um einige Millimeter schwächeren Leere von



Fig. 105.

mindestens 4 bis 5 m Länge in Form eines schmiedeeisernen Rohres (Fig. 104). Dieses wird in die durch Aneinanderlegen der vorerwähnten Hälften gebildete Rinne als Richtscheit gelegt und nach dem Verlegen jeden Steines vorgeschoben.

Entweder wird das Kabel jetzt eingelegt und der Kabelkanal durch Auflegen der zweiten Steinhälfte geschlossen, oder der Kanal wird erst fertiggestellt und das Kabel nachträglich eingezogen. — Jedenfalls werden nach dem Auflegen der oberen Hälften die äusseren Fugen mit Mörtel ausgeworfen und eventuell das ganze Kanalsystem mit Ziegelsteinen ummauert (Fig. 105); zur grösseren Sicherheit kann auch die in Fig. 106 wiedergegebene Anordnung gewählt werden. Sollen die Kanäle unmittelbar unter den Fusssteigen liegen, so werden die Steine flach verlegt (Fig. 107).

65.
Verlegen in
Beton und
Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrestöße wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefährem Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung WAYSS & FREYTAG, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie die vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die in erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grosser Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung von weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das DOULTON-System wieder, welches mit dem vorher beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

WAYSS & FREYTAG, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.¹⁾ Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbeton, gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und die Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Dadurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik KOTHE & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt Unterschied gegen die vorherbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsrichtung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 122), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Hohlkreisdurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein ein grosser Ersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erzielt, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und ausbezogen werden können.

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65.
Verlegen in
Beton und
Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrenstösse wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefährem Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung WAYSS & FREYTAG, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie die vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die in erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grossem Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung von weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das DOULTON-System wieder, welches mit dem vorher beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

WAYSS & FREYTAG, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.¹⁾ Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbeton gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und durch Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Hierdurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu den Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich das plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik KOTHE & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt den Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöffnung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 114), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist nicht ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die Kabel sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des Kanaldurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Materialersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erreicht, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzeln ein- und ausgezogen werden können.

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65.
Verlegen in
Beton und
Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrenstösse wird während des Einstampfers eine Gummiwalze von ungefährem Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung WAYSS & FREYTAG, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie die vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die in erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grossem Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung von weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das DOULTON-System wieder, welches mit dem vorher beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

WAYSS & FREYTAG, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.¹⁾ Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbeton gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und durch Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Hierdurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu den Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich das plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik KOTHE & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt den Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöffnung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 114), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist nicht ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die Kabel sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des Kanaldurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Materialersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erreicht, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzeln ein- und ausgezogen werden können.

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65.
Verlegen in
Beton und
Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrenstösse wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefährem Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung WAYSS & FREYTAG, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie die vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die in erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grossem Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung von weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das DOULTON-System wieder, welches mit dem vorher beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

WAYSS & FREYTAG, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.¹⁾ Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbeton gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und durch Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Hierdurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu den Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich das plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik KOTHE & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt den Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöffnung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 114), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist nicht ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die Kabel sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des Kanaldurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Materialersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erreicht, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzeln ein- und ausgezogen werden können.

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65.
Verlegen in
Beton und
Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrenstöße wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefährem Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung WAYSS & FREYTAG, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die der ersten Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grosser Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das DOULTON-System wieder, welches mit dem vorbeschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

WAYSS & FREYTAG, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.¹⁾ Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbrei, gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und die Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Dadurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu den Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich das plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik KOTHE & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt einen Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöffnung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 122), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist in jedem Stein ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die Kanäle sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des Kanaldurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Materialersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erreicht, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzeln aus- und ausgezogen werden können.

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.



1

1

1

L

Abzweigmuffe für konzentrische Kabel.

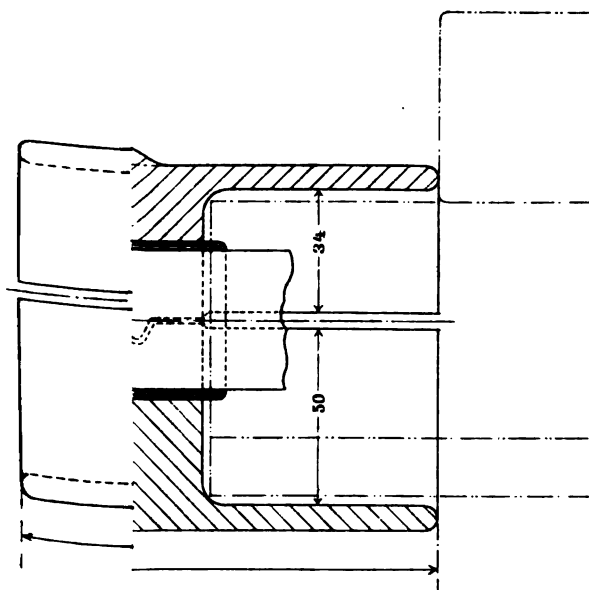
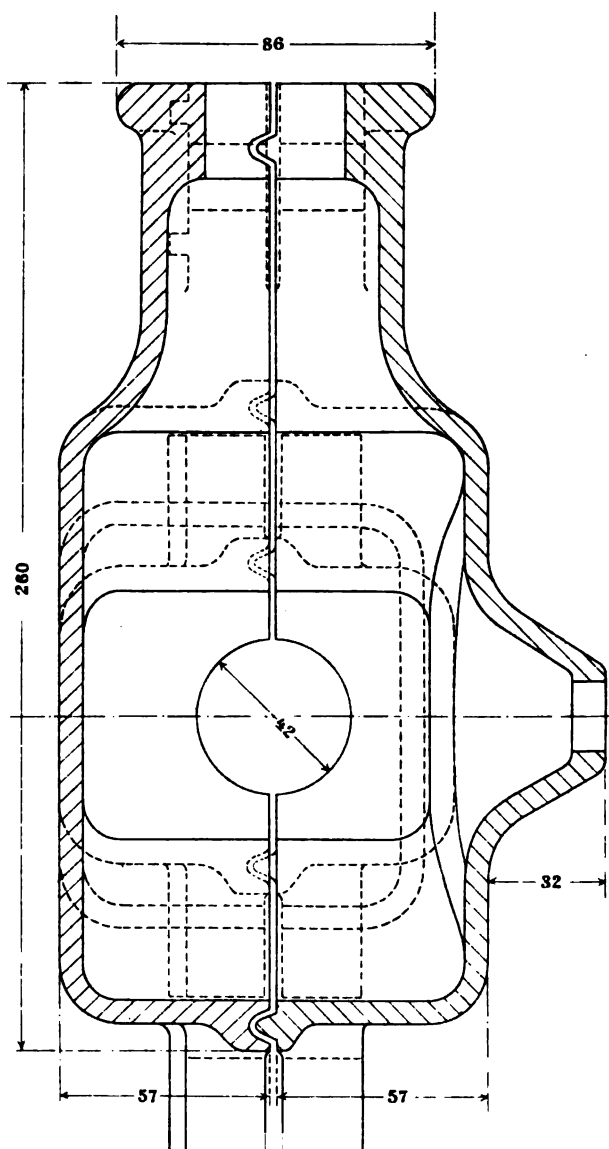
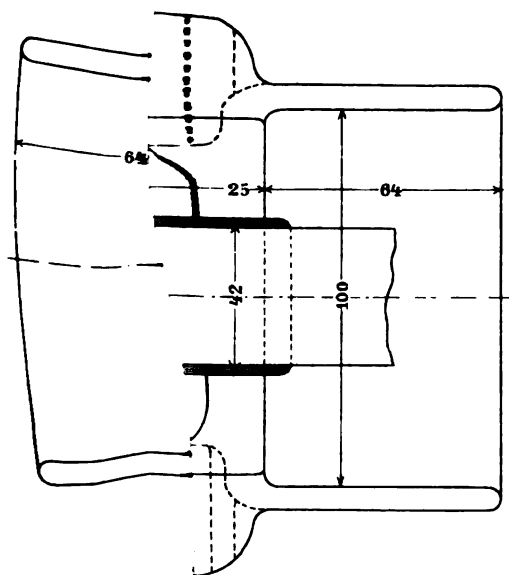
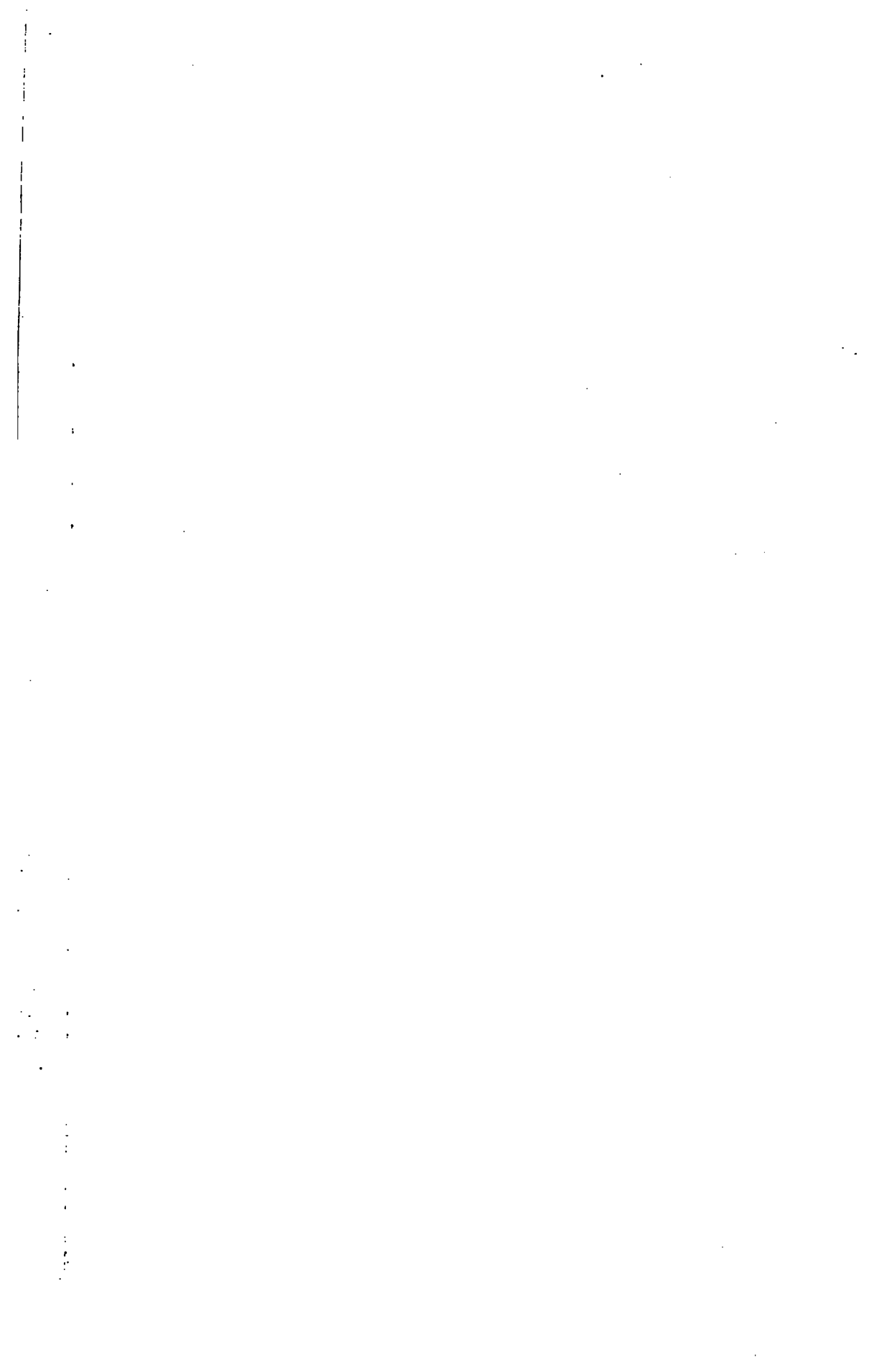


Fig. 120.







nicht durch Keile, sondern durch Schrauben verbunden. Der Preis soll sich pro laufenden Meter Abdeckung auf Mk. 2·96 belaufen. Vielfach sind aber noch Kabelsteine, bestehend aus Thonfaçonschalen, oder aus Beton gepresste Kabelsteine verwendet. Erstere kosteten Mk. 1·44 bis 1·68 und die letzteren Mk. 1·30 pro laufenden Meter fertiger Abdeckung.

In Königsberg ist das unterirdische Leitungsnetz nach dem Fünfleitersystem angeordnet; die Leitungen bestehen aus blanken Kupferschienen, welche auf Porzellanisolatoren montiert und in Monierschächten geführt sind.

Ausserdem werden in Königsberg Normal-Kabelsteine verwendet, und zwar vorzugsweise bei Kabelkreuzungen u. s. w.; ein Meter Abdeckung, wie diese den Zwecken des Werkes dient, kostet Mk. 1·60.

In Fig. 111a ist eine Verlegung der Kabelkanäle dargestellt, wie sie ähnlich z. B. im städtischen Elektrizitätswerk Nürnberg erfolgt ist und zwar an allen Strassenübergängen und in Strassen, die mit Asphalt oder Holzpflaster versehen sind, bei denen ein späteres Aufreissen möglichst vermieden werden soll. An Strassenübergängen liegen an mehreren Stellen 6—8 solcher Kanäle nebeneinander. In jedem Kanal liegt nur ein Kabel und ein Eisendraht, durch welchen letzteren das Einziehen des Kabels erfolgt. Das Innere des Kanals ist frei, um das Kabel leicht herausziehen zu können.

Die in Fig. 111 a—c dargestellten Verlegungsarten sind auch vom Elektrizitätswerk der Stadt Luzern ausgeführt. Die armierten Kabel für Hochspannung sind neben, oder bei Verlegung mehrerer Kanäle zwischen diesen angeordnet, wie aus Fig. 111 b und c zu ersehen ist. Im ersteren Falle liegt nur die eine Seite des verwendeten Deckels auf dem Nebkanal auf, die andere dagegen auf dem Erdreich; im zweiten Falle ist der Deckel durch zwei Kanäle gestützt und bildet dieser Raum einen Kanal für sich.

Bei Wechsel- und Drehstromanlagen lassen sich noch weitere Anordnungen treffen, indem man einen  oder einen  förmigen Graben aushebt. Bei der ersteren Form verlegt man auf die mittlere Erhöhung z. B. die Speisekabel und in die beiden Vertiefungen je die Hoch- und Niederspannungsverteilungskabel, während man bei der zweiten Form das Speisekabel in die mittlere Vertiefung und die Verteilungskabel in die beiden Erhöhungen legen würde.

68.
Bettungs-
praxis in
England.

Interessant ist eine Zusammenstellung der Bettungspraxis in England von Dr. BAUR.¹⁾

Die 52 Elektrizitätswerke in London und Umgebung, die in den Jahren 1883—1899 gebaut worden sind, haben ihre Kabel meistens nach zwei oder drei verschiedenen Systemen eingebettet. Gepanzerte Kabel sind grösstenteils ohne Bettung verlegt.

Die nachstehende Zusammenstellung giebt eine Übersicht, wie vielmal, d. h. von wie vielen Werken die einzelnen Bettungsarten angewendet sind:

Direkte Bettung in Erde	19 mal
Bettung in Thon und Steingut	27 „
„ „ Eisenrinnen	12 „
„ „ Eisenröhren	13 mal
„ „ Holz	3 „

1) Dr. C. BAUR, Das elektrische Kabel, Berlin 1903, S. 213.

gelegt (Fig. 128). Während des Einhängens der Kabel muss am Anfang desselben ein Mann mit einsteigen, welcher das Kabelende führt. Wird das Kabel mit einem Hilfseil herabgelassen, so wird auch jede Verbindungsschelle (Fig. 129 a) von einem Mann begleitet, damit das Kabel an keiner Stelle der Schachtzimmerung hängen bleibt. Es könnte sich sonst eine Schleife bilden, die es erforderlich macht, das Kabel wieder heraufzuholen. Es kann auch vorkommen, dass die festgesetzte Schelle plötzlich abrutscht, wobei auf das hängende Kabel ein solcher Zug ausgeübt werden könnte, dass es zerreist.

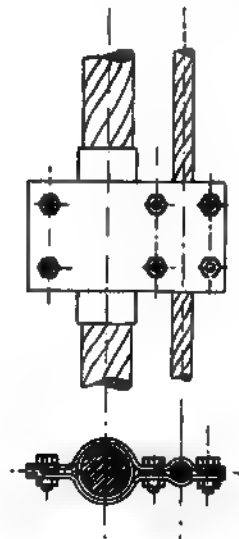


Fig. 129 a.

Wenn die Schächte breit genug sind, dass es möglich ist, die ganze Kabeltrommel in den Schacht herunterzulassen, so empfiehlt sich das Heraufholen des Kabels von unten. Die Kabeltrommel wird auf der Sohle des Schachtes aufgestellt, das Hilfseil mit der aus den Armaturdrähten gebildeten Öse verbunden und langsam emporgewunden, wobei die Kabeltrommel nachgedreht wird.

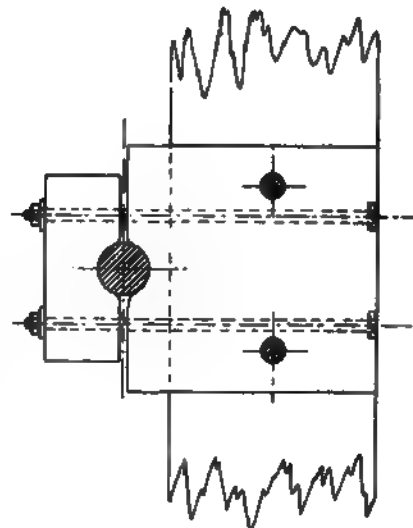


Fig. 129 b.

72.
Befestigung
des ein-
gehängten
Kabels.

Bei Kabeln geringerer Querschnitte kann wohl auch die Kabeltrommel auf der Förderschale selbst aufgestellt werden, das Kabelende wird oben befestigt und dann lässt man es durch sehr langsames und vorsichtiges Herunterlassen der Förderschale von der Kabeltrommel ablaufen.

Bevor jedoch mit der Verlegung und Einhängung des Kabels begonnen wird, müssen die Schellen, die zur Befestigung des Kabels dienen sollen,

3. Betonplatten 8 cm dick mit Eiseneinlage (zum Abdecken der Kabel)

Breite 20 cm, Preis pro Meter Mk. 0·60

"	25	"	"	"	"	"	0·70
"	30	"	"	"	"	"	0·85
"	40	"	"	"	"	"	1·15

4. Wiederherstellung des Pflasters bei Verwendung des brauchbaren Materials:

a)	Makadam	. . . . .	pro m ²	Mk.
b)	Kleines Steinpflaster	. . . . .	"	"
c)	Granitpflaster in Sandbettung	. . . . .	"	"
d)	"	"	mit Mastixausguss	"
e)	Cement-Trottoir	. . . . .	"	"
f)	Asphalt-Trottoir	. . . . .	"	"
g)	Klinkerpflaster in Zementmörtel mit Betonunterlage		"	"
h)	"	"	ohne	"

5. Herstellen von Kabelverbindungen inkl. Material und Montage:

		Muffen:		Lötstellen:	
		einpol. Mk.	zweipol. Mk.	einpol. Mk.	zweipol. Mk.
Bis	50 mm ² Querschnitt	15·—	22·—	7·—	12·—
"	100 " "	20·—	30·—	8·—	15·—
"	200 " "	25·—	40·—	10·—	18·—
"	500 " "	40·—	50·—	12·—	20·—

7. Herstellung von Kabelabzweigungen inkl. Material und Montage:

		Muffen:		Lötstellen:	
		einpol. Mk.	zweipol. Mk.	einpol. Mk.	zweipol. Mk.
Bis	50 mm ² Querschnitt	20·—	28·—	8·—	15·—
"	100 " "	25·—	35·—	9·—	17·—
"	200 " "	35·—	45·—	10·—	19·—
"	500 " "	50·—	70·—	12·—	22·—

Selbstverständlich werden die angegebenen Kosten den örtlichen Verhältnissen, der Bodenbeschaffenheit und auch der Jahreszeit entsprechen und es lassen sich daher auch die mittleren Werte mit Sicherheit nicht angeben. Die vorstehend genannten Zahlen sollen daher auch nur ungefähre Anhaltspunkte darstellen und man wird bei genaueren Berechnungen stets von Fall zu Fall den Verhältnissen entsprechend zu entscheiden.

Freileitungen.

Unter Freileitungen¹⁾ versteht man diejenigen Leitungen, welche ausserhalb der Gebäude und ohne besonderen Schutz gegen die Unbilden der Witterung montiert sind. Sie werden teils auf Gestängen an den Gebäuden selbst, teils an besonderen Masten und zwar auf Isolatoren verlegt.

Leitungsmaste.

Hölzerne Maste.

Als Leitungsmaste werden hauptsächlich Nadelhölzer, seltener Laubhölzer verwendet.

74.
Art der
Hölzer.
Fällungs-
zeit.

Von den ersteren haben Kiefer (*pinus silvestris*), Fichte (*pinus abies* und *abies excelsa*), Lärche (*pinus larix*), Tanne (*pinus picea*, *abies pectinata*, *picea vulgaris*) die meiste Verbreitung gefunden; von Laubhölzern werden, wenn auch selten, Eiche (*quercus*), Kastanie (*castanea vesca*) und mitunter auch Buche verwendet.²⁾

Als Fällungszeit der Stangen werden im allgemeinen die Wintermonate (November bis Februar) als am günstigsten bezeichnet. Hierfür scheinen hauptsächlich praktische Gesichtspunkte massgebend zu sein, weil im Winter billigere Arbeitskräfte zu haben sind und die Beförderung der geschlagenen Hölzer aus den Wäldern in den Wintermonaten am leichtesten und billigsten auszuführen ist.

Da die Hölzer nur in den Monaten April bis Oktober trocknen, in der Zeit von Oktober bis April dagegen auf ein Trocknen nicht gerechnet werden kann, so ist auch dieser Umstand für die Winterfällung von praktischer Bedeutung. Sollen hingegen die Maste mit Kupfervitriol imprägniert werden, so ist schon durch die Art dieser Imprägnierung³⁾ die Fällung in der Saftzeit (also im Sommer) erforderlich.

Als Maste für elektrische Anlagen können in erster Linie nur gerade gewachsene und gesunde Stämme ohne Astlöcher und Spalten verwendet werden; sie dürfen weder schwammig oder kronschällig sein. Hauptbedingung ist, dass die Maste wirkliche Stammenden der Bäume waren.

75.
Beschaffen-
heit der
Stangen.
Lebens-
dauer.

1) § 3 der Sicherheitsvorschriften.

2) Näheres siehe Hdb. XII, S. 628.

3) Näheres siehe Hdb. VI, 2, S. 115.

Nach dem Schälen der Stämme wird das untere Ende senkrecht zur Mastmitte durchschnitten, das Kopfende kegelförmig zugeschnitten; das letztere wird später gern mit einem kleinen Zinkdach benagelt.

Die Maste haben, wenn sie in diesem rohen Zustand verwendet werden, meistens nur eine beschränkte Lebensdauer von etwa 4—5 Jahren;¹⁾ Eichen erhalten sich jedoch bedeutend länger, werden in der Regel auch nicht imprägniert, haben aber selten geraden Wuchs.

Holzmaсте sind der Zerstörung durch Fäulnis, hauptsächlich aber an den Stellen ausgesetzt, die an der Erdoberfläche und wenig unter dieser liegen.

Es ist daher zumeist erforderlich, um die Lebensdauer der Stangen zu erhöhen, dieselben mit fäulnishindernden Substanzen zu tränken.

Die Fäulnis, die entweder eine trockene (Vermoderung) oder nasse sein kann, wird eingeleitet durch die Zersetzung gewisser Bestandteile des Holzsaftes, welche sich dann auf die Holzfaser überträgt, die an und für sich nicht zur Fäulnis neigt, da sie nur aus Kohlehydraten besteht. Während sich die stickstoffhaltigen Teile des Holzsaftes, wie Pflanzenleim, Kleber und Eiweiss, überaus leicht zersetzen, sind die stickstofffreien, wie Gummi, Zucker, Dextrin, der Fäule nicht ausgesetzt, die harzigen Bestandteile arbeiten ihr sogar entgegen.

Die eigentlichen Urheber der Fäule (Fermentwirkungen) sind mikroskopische Organismen, die in den stickstoffhaltigen Bestandteilen reichliche Nahrung finden. Ihre Vernichtung hat die Verhinderung der Fäule zur Folge oder sie wird doch zum mindesten so lange aufgehalten, bis sich unter dem Einfluss von Luft und Feuchtigkeit neue Erreger angesiedelt haben.

Imprägnierung der Holzmaсте.

76.
Imprägnierung
durch natürliche
Harzansammlung.

Durch die Anwendung fäulnishindernder Substanzen wird den Keimen die Lebensbedingung entzogen. Dies geschieht so lange, als die Imprägnierung ihre Wirkung behält.²⁾

In dem norwegischen Fachblatt „Telegraph Bladet“ wird berichtet, dass in Norwegen die zur Fällung bestimmten Bäume im Sommer des der Fällung vorausgehenden Jahres bis zu etwa 3 m Höhe vom Erdboden aus abgeborkt werden, wodurch der Stamm, insbesondere dessen unteres Ende, sehr reich mit Harz durchsetzt wird. Die Harzabscheidung wird infolge der Überfüllung der Zellen so gefördert, dass dasselbe aus dem Stamm ausscheidet. Der starke Harzgehalt des später in der Erde steckenden Endes des Stammes ist dann imstande, die aus diesen Stämmen gewonnenen Stangen längere Zeit gegen Fäulnis zu schützen. Die Kosten werden nicht wesentlich höher gegenüber denen frischer Stangen, da sich die sowieso erforderliche Arbeit des Abborkens auf zwei Jahre verteilt.

77.
Imprägnierungsarten.

Die Dauer der Schutzwirkung der Imprägnierung wird nun von der Wahl des Tränkungsmitteis abhängen. Je leichter dasselbe im Wasser löslich ist, um so schneller wird es ausgelaugt; ebensowenig vermag die Tränkung mit leicht flüchtigen Ölen einen dauernden Schutz zu gewähren.

1) Siehe auch ETZ 1905, S. 147.

2) Näheres siehe „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung 1897“.

In früheren Jahren wurden seitens der norwegischen Telegraphenverwaltung die Stangen dadurch imprägniert, dass ein 75 cm über dem Boden in dem lebenden Stamm angebrachtes Loch von 25 mm Durchmesser, welches nach innen starkes Gefälle besass, mit etwa 100—150 g zerstoßenem Kupfersulfat angefüllt und durch einen Pflock verschlossen wurde. Nach etwa drei bis vier Monaten war das Sulfat absorbiert und wurde so oft erneuert, bis die ganze Stange durchdrungen war.

Die imprägnierende Wirkung des Kupfervitriols rührt daher, dass dasselbe mit den im Holze befindlichen Eiweissstoffen unlösliche Verbindungen eingeht, die jedoch durch Kalk und dessen Lösungen rasch zersetzt werden. Stangen, welche nach diesem Verfahren imprägniert sind, dürfen daher nicht in kalkhaltigen Boden gesetzt werden, da sie dann ungemein rasch verschleissen.

2. Imprägnierung mit Zinkchlorid.

Zinkchlorid wird durch Auflösen von Zink in Salzsäure hergestellt, kann aber auch fertig von chemischen Fabriken bezogen werden; es hat ein spezifisches Gewicht von 1.598 entsprechend 54° Beaumé und besteht aus beinahe gleichen Teilen Chlorzink und Wasser.

Die zur Imprägnierung verwendbare Chlorzinklösung darf keine freie Salzsäure enthalten und muss möglichst arm an Eisenverbindungen sein. Die höchste Beimischung von letzteren darf 0.1 % nicht übersteigen. Freie Salzsäure greift die Holzfaser an. Durch die Einwirkung von Eisen zersetzt sich die Zinkchloridlösung in Salzsäure und Zinkoxyd. GRITNER-Budapest verlangt daher, dass Holz, welches mit Chlorzink imprägniert ist, mit Eisen nicht in Verbindung kommen soll.¹⁾

Zur Imprägnierung wird ein Teil der gesättigten Chlorzinklösung mit 20 Teilen Wasser verdünnt, so dass die Lösung 3° Beaumé zeigt.

Die Hölzer werden geschält, in einen entsprechend langen Kessel gebracht und dann der Einwirkung eines Wasserdampfes ausgesetzt, welcher nach einer halben Stunde die Temperatur im Kessel auf 100° C. gebracht hat. Bei dieser Temperatur erfolgt eine zweistündige Dämpfung.²⁾ Nachdem durch einen Hahn am Boden des Kessels das Kondenswasser abgelassen worden ist, wird ein Vakuum von mindestens 520 mm Quecksilbersäule hergestellt, welches etwa 1½ Stunden unterhalten wird.

Erst nach dieser Vorbereitung wird die Chlorzinklösung eingelassen und unter einen Druck von 7 Atmosphären gebracht. Nach einer einstündigen Einwirkung sind alle Poren von der Imprägnierungsflüssigkeit durchdrungen.

Kieferne Hölzer sollen auf einen Kubikmeter mindestens 300 kg Chlorzinklösung aufnehmen.

Die Stämme geben, namentlich bei trockener Witterung, einen grossen Teil der aufgenommenen Flüssigkeit durch Verdunstung wieder ab, wobei auch geringe Mengen von Chlorzink mitgenommen werden. Bei der leichten Löslichkeit des Mittels im Wasser wird ein weiterer Teil durch Regenwasser ausgelaugt, so dass die Maste nach und nach den durch die Imprägnierung erreichten Schutz gegen Fäule verlieren. Immerhin wird auch durch diese

1) Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung, 1897.

2) Näheres siehe S. 119 dieses Bandes.

zu Tage treten können, z. B. bei Brückenhölzern, Eisenbahnschwellen u. s. w., oder bei Leitungsmasten an solchen Stellen, wo Menschen selten hinkommen. Ein Anstreichen der Stangen, welche mit Teeröl getränkt sind, mit Ölfarbe ist völlig ausgeschlossen. — Derart imprägnierte Stangen haben eine Lebensdauer von etwa 15, und wenn die Beschaffenheit des Holzes an und für sich sehr gut war, sogar bis zu 20 Jahren.

4. Imprägnierung mit Quecksilbersublimat, sogenannte Kyanisierung.

Nach dem Erfinder KYAN wird ein Verfahren benannt, durch welches die fäulniswidrigen Eigenschaften von Quecksilbersublimat ausgenutzt werden, um eine gute Konservierung des Holzes zu erreichen.

Dieses Verfahren¹⁾ beruht hauptsächlich auf Bildung unlöslicher Verbindungen des Metallsalzes mit den Eiweissbestandteilen des Holzsaftes. Es genügt schon die blosse Einlaugung geringer Mengen des Sublimates in das Holz, um einen wirklichen Schutz gegen Fäulnis zu gewähren, da dieses Mittel ausserordentlich fäulnishindernde Wirkungen ausübt. Auch dürfte die Anwendung dieses Verfahrens das einfachste sein, da alle anderen Mittel mehr oder weniger Hinzuziehung besonderer Kräfte, maschineller Einrichtungen u. s. w. erfordern.

Um zu prüfen, ob Holz mit Sublimat behandelt ist — das Aussehen wird dadurch nicht verändert —, bestreicht man es mit Schwefelammonium, wodurch beim Zusammentreten mit Sublimat eine dunklere Färbung der bestrichenen Stelle hervorgerufen wird. Wird der Querschnitt des durchtränkten Mastes auf diese beschriebene Weise untersucht, so wird nur auf einem verhältnismässig schmalen Ringe, von der Aussenfläche an, eine dunklere Färbung erscheinen, während das Innere unverändert bleibt.

Das Holz, welches für die Kyanisierung in Frage kommt, soll nur im Winter, also ausserhalb der Saftzeit („Wadel“) gefällt, gut ausgetrocknet und sauber entrindet sein. Durch gehörige Austrocknung der Hölzer, zweckmässige Aufstapelung und unbehinderten Luftzutritt werden die Maste für die Aufnahme der Imprägnierungsflüssigkeit ganz besonders fähig, zumal sich infolge des Trocknens sogenannte Luftrisse bilden, welche das Holz mehr freilegen.

Ein Anstrich der kyanisierten Stangen ist ohne weiteres möglich.

Nach amtlichen Ermittlungen soll die durchschnittliche Lebensdauer der nach KYANSchem Verfahren behandelten Leitungsstangen ca. 17 $\frac{1}{2}$ Jahre betragen. Die Imprägnierung mit Sublimat würde jedenfalls bedeutend günstigere Resultate zeitigen, wenn sie in geschlossenen Gefässen unter Druck erfolgen könnte, nachdem die Hölzer vorher gedämpft und dann die Luft aus den Behältern evakuiert worden wäre. Dies ist aber nicht möglich, da das Sublimat die zur Verwendung kommenden Metalle bald zerstören würde.

Ausserdem können nur dünne Lösungen verarbeitet werden, da das Sublimat eines der schärfsten Gifte und infolgedessen das Arbeiten mit den für das Verfahren erforderlichen grossen Mengen wenig angenehm ist.

1) Nach Angaben von GEBR. HIMMELSBACH, Freiburg i. B.

Danach beginnt ohne Verminderung der Luftverdünnung die Füllung des Tränkungskessels mit der Tränkungsflüssigkeit, welche vorher auf mindestens 65°C . erhitzt worden ist.

Nach erfolgter Füllung wird die Tränkungsflüssigkeit mittels Pumpen in das Holz gedrückt und der Druck auf mindestens 7 Atmosphären Überdruck gesteigert.

Um die Sättigung des Holzes möglichst vollkommen zu erreichen, soll dieser Druck bei Kiefern- und Buchenholz wenigstens 30 Minuten, bei Eichenholz aber 60 Minuten erhalten bleiben; nach Bedürfnis muss diese Zeit verlängert werden, bis die vorschriftsmässige Aufnahme an Tränkungsflüssigkeit erreicht ist.

Die zur Tränkung benutzte Chlorzinklösung muss ebenso rein sein wie die bei dem zu zweit angeführten Verfahren, jedoch verlangt RÜTGERS, dass sie eine Stärke von $3.5^{\circ}\text{Bé} = 1.0244$ spez. Gewicht bei 15°C . habe. Der Gehalt dieser Lösung an metallischem Zink beträgt 1.26 Hundertteile.

Das zuzusetzende Teeröl darf höchstens 1 Hundertteil unter 125°C . siedendes Öl enthalten. Es muss so schwerflüchtig sein, dass der Siedepunkt hauptsächlich zwischen 350 bis 400°C . liegt; es dürfen sich keineswegs mehr als 25 Hundertteile unter 235°C . verflüchtigen. Der Gehalt an sauren, in Natronlauge von 1.15 spez. Gewicht löslichen Bestandteilen (karbolsäureartigen Stoffen) muss mindestens 10 Hundertteile betragen.

Das Teeröl muss bei -20°C . vollständig flüssig und möglichst frei von Naphthalin sein. Das spez. Gewicht soll bei -15°C . zwischen 1.03 bis 1.10 betragen.

Das Teeröl wird während der Erwärmung der Chlorzinklösung zugesetzt.

Um eine möglichst vollkommene Mischung beider Substanzen zu erreichen, muss eine gute Mischvorrichtung unter Zuströmung von Dampf und Luft angewendet werden.

Es wird von RÜTGERS gewährleistet, dass die durchschnittliche, für jede Kesselfüllung in Betracht zu ziehende Aufnahme an Chlorzinklösung einschliesslich des Zusatzteeröles beträgt:

für 1 cbm Kiefern- oder Buchenholz in verschiedenen Abmessungen 310 bzw. 325 kg und für die gleiche Menge Eichenholz 100 kg.

Diese gewährleistete Aufnahme setzt voraus, dass das Holz gesund und im Wadel gefällt, ausserdem derartig trocken ist, dass der Kubikmeter Kiefernholz nicht über 630, Buchenholz nicht über 725 und Eichenholz nicht über 800 kg wiegt.

Wenn wegen ungenügender Trockenheit oder besonders kerniger Beschaffenheit des Holzes die gewährleistete Aufnahme an Tränkungsflüssigkeit nicht erreicht werden kann, so soll die Chlorzinklösung entsprechend verstärkt werden.

Zur Feststellung der von dem Holze bei dem eben beschriebenen Tränkungsverfahren aufgenommenen Menge Chlorzinklösung wird das Holz zunächst vor dem Einfahren in die Tränkungskessel und zum zweiten Male nach geschehener Tränkung, und zwar beim Ausziehen aus den Tränkungskesseln mittels Brückenwage gewogen. Der Gewichtsunterschied ergibt die aufgenommene Menge Tränkungsflüssigkeit.

Das Holz wird bei dieser Tränkung wirksamer gegen Fäulnis geschützt als durch die Tränkung mit reiner Chlorzinklösung. Das Teeröl dringt aller-

Salze Verwendung finden, so würde sich im eisernen Tränkungskessel das Kupfer ausfällen und die Wandungen angreifen. Diesen Doppelsalzen werden je nach den Umständen Kalium- und Kalciumverbindungen zugesetzt, welche für sich allein die Zellenwandungen nicht durchdringen können, in Verbindung mit metallischen Lösungen aber von denselben durchgelassen werden.

Statt des Eisenvitriols könnte auch Quecksilbersublimat verwendet werden, wenn nicht der hohe Preis die Verwendung ausschliesse. Billige Oxydulschwerer Metalle, welche in grossen Mengen zu haben wären, auch zugleich dauerhaft sind und antiseptisch wirken, existieren ausser dem Eisenvitriol augenblicklich nicht.

Vor der Ausführung des chemischen Verfahrens werden die Hölzer auch hier einer längeren Dämpfung ausgesetzt und dann ein Vakuum hergestellt. Hierauf wird die erwärmte Imprägnierungsmasse eingelassen und durch Dampfzuführung allmählich auf eine Atmosphäre Überdruck gebracht. Für 1 cbm Holz sind etwa erforderlich

ca. 2.5 kg	Eisenvitriol
„ 2.0 „	schwefelsaure Thonerde
„ 1.0 „	Kupfervitriol
„ 1.5 „	Kainit oder Sylvinit, event. Chlorkalcium, je nach den Umständen.

Um festzustellen, dass die Imprägnierung gut ausgeführt ist, befeuchtet man ein Stück des imprägnierten Holzes mit einer Lösung von Blutlaugensalz. Zunächst zeigt sich keine Färbung, weil die Chemikalien mit dem Holze chemisch verbunden sind. Sowie sie aber durch Befeuchten mit Salzsäure aus der Verbindung gelöst sind, färbt sich die Fläche blau, weil das freigewordene Eisenvitriol mit Blutlaugensalz das Pariser Blau liefert.

Die in der Fig. 130 wiedergegebenen Photographien zeigen Hölzer vor und nach der Imprägnierung, sowie den Einfluss der Feuchtigkeit, wenn sie überhaupt nicht imprägniert sind.

78.
Imprägnierung im elektrochemischen Bade.

Ein neues Verfahren zum Imprägnieren von Masten¹⁾ besteht darin, dass sie in einen Bottich gelegt werden, der mit zwei Bleielektroden ausgerüstet ist. Das Gefäss wird mit einer Harzlösung, Borax und Natriumkarbonat, angefüllt und an die beiden Elektroden, zwischen denen die Maste liegen, an eine Stromquelle angeschlossen, welche mit 110 Volt Spannung arbeitet. Unter dem Einfluss des Stromes soll der Holzsaft ausscheiden und an seine Stelle die Imprägnierstoffe treten. Der Prozess dauert 5 bis 8 Stunden, wobei die Temperatur der Flüssigkeit auf 50° C. steigt.

79.
Anstrich der Maste.

Das Anstreichen der Maste mit Ölfarbe und ähnlichen Mitteln ist nicht vorteilhaft, wenn auch häufig nicht zu umgehen; es kann sogar, wenn z. B. nicht genügend ausgetrocknetes Holz verwendet wird, direkt schädlich wirken. Die in dem Holze vorhandene Feuchtigkeit hat durch die infolge des Anstrichs gebildete undurchdringliche Decke keinen Abzug, so dass eine Fäulnis eher eintritt, als wenn ganz ohne den Anstrich die Luft ungehinderten Einlass gehabt hätte. Aber auch bei trockenem Holze verliert die Anstrichdecke den Halt und bröckelt ab, da sie der Luft, dem Lichte und Regen ausgesetzt ist.

80.
Untersuchung der Maste.

Die hölzernen Stangen sind jeweils im Frühjahr und Herbst jeden Jahres in Bezug auf Beschaffenheit des Holzes, den senkrechten Stand, auf Ver-

1) El. Rev. New York, Bd. XL, S. 733.

Im Laufe der ersten zehn Jahre wird in jedem zweiten Herbst eine genauere Prüfung der Leitungsmaste vorgenommen. Nach Verlauf dieser Zeit müssen die Stangen mindestens in jedem Herbst revidiert werden.

Zu diesem Zweck sind dieselben bis auf 20 oder 25 cm durch Aufgraben freizulegen und mittels eines geeigneten spitzen Instrumentes (Stichel, feststehendes Messer u. s. w.) anzustossen, so dass man an dem Widerstande, den das Holz dem Stosse entgegensetzt, erkennen kann, ob es weich ist oder nicht.

Wenn Stangen zwar äusserlich gesundes Holz zeigen, aber beim Beklopfen einen dumpfen Ton geben, ist auf Kernfäule zu schliessen; dann ist das Innere mittels eines ca. 5 mm starken Bohrers zu prüfen und das Bohrmehl zu untersuchen. Hat man keinen Anlass zu Bedenken, so wird man das Bohrloch mit einem harten Holzstift wieder schliessen.

Bei Stangen bis zu einer Länge von 11 m ist das Untersuchen des Holzes, wenn der Mast weder verstrebt noch verankert ist, einfacher. Man muss eine Stützgabel an das obere Ende im rechten Winkel seitlich zur Leitungsrichtung spreizen und die Stange in mässige Schwingungen versetzen. Faule Stangen werden dann dicht über dem Erdboden ein leises, krachendes bzw. knisterndes Geräusch von sich geben.

Um die Untersuchung zu erleichtern, empfiehlt es sich, in die Maste das Datum ihrer Einsetzung einzubrennen. Durch eingebrannte Buchstaben wird ferner die Art der Imprägnierung bezeichnet, und zwar bedeuten

C Imprägnierung mit Kupfervitriol

Q " " Quecksilberchlorid

K " " Teerölen.

Ausserdem werden die Maste in Fernleitungen auch noch mit fortlaufenden Nummern versehen.¹⁾

81.
Schutzmittel
bei rohen
Stangen.

In vielen Gegenden wird man des kostspieligen Transportes wegen imprägnierte Maste nicht beziehen und hauptsächlich dann nicht, wenn in unmittelbarer Nähe Wälder sind, denen gutes und billiges Stangenmaterial entnommen werden kann. Man wird aber auch in solchen Fällen einen Schutz anstreben, hauptsächlich an den Stellen, an denen die Maste am meisten gefährdet sind. Man pflegt sie zum wenigsten an dem Teile, welcher in die Erde hineinragt und am Zopfende mit Karbolineum (AVENARIUS-Patent) satt anzustreichen.²⁾ Es empfiehlt sich, diesen Anstrich im Laufe der Jahre hin und wieder zu wiederholen. Für etwa 4 bis 6 qm Fläche ist 1 kg erforderlich.

Ein weiteres Mittel, um den in der Erde steckenden Teil zu schützen, besteht darin, dass man diesen Teil ankohlt und dann mit Steinkohlenteer anstreicht.

82.
Schutz-
schäfte.

Es wird auch versucht, durch die Anbringung von besonderen Schutzschäften die Lebensdauer der Maste zu erhöhen. Von diesen Schutzmitteln sind zwei bekannt, und zwar das eine, D. R.-P. No. 72 880, Anbringung von Faltenpappe,³⁾ (Fig. 131) und ferner Schutz durch Eisen (Fig. 132).

Die in die Erde reichenden Stämme werden mit Faltenpappe umnagelt (Fig. 131 b) und die Hohlräume mit antiseptischen Stoffen ausgegossen.

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 32.

2) ETZ 92, Heft 22.

3) ETZ 94, Heft 4, auch Kalender von UPPENBORN, 1905.

Bei dieser Arbeit wird insbesondere auch die Anwendung von Weisskalk empfohlen, welcher in hohem Grade geeignet sein soll, das Holz zu konservieren. Der unter der Erde reichende Teil der Pappe soll zum Schutz gegen direkte Be-

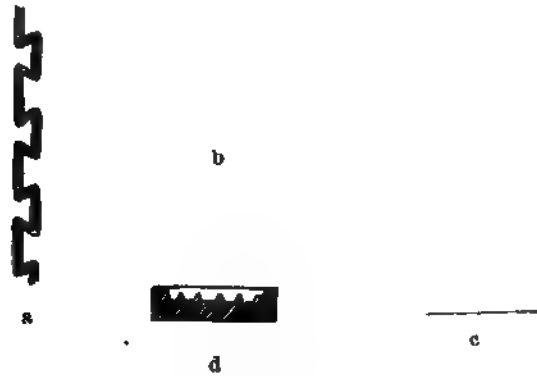


Fig. 131.

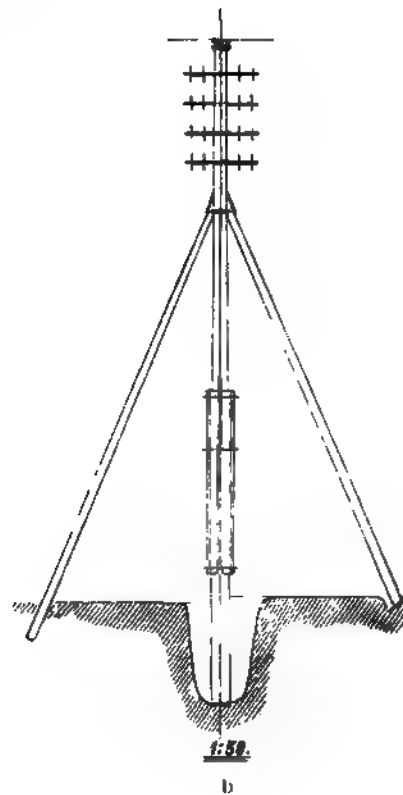


Fig. 132.

bedienung mit einem Cementverputz¹⁾ versehen werden. Um der Stange

1) Neuerdings werden von BOURGIEAT Cementmaste mit Holzeinlage vorgeschlagen:
 a) Schweizerische Elektrotechnische Zeitschrift 1905, S. 89.

einen festen Halt zu geben, soll dieselbe auf einen etwa 28 cm grossen, 8 bis 10 cm starken Formstein gestellt werden (Fig. 122 c—d), welcher vorher mit Imprägnierstoff angefüllt werden kann. Die Kosten für dieses Verfahren werden angegeben wie folgt:

an Pappe 1·07 qm	Mk. 1·07
an Kalkmilch zum Einguss inkl. Verlust	
durch Verschütten rund 4 l	„ 0·03
an Pappnägeln	„ 0·03
1 Formziegel	„ 0·10
1 Cementsockel kompl. 30 cm hoch,	
5 cm unter Erde reichend, 3 1/2 cm stark	„ 0·20
	<hr/>
	Mk. 1·43

Bei dem zweiten Verfahren¹⁾ ist man bestrebt, durch die Anbringung von Eisenkonstruktionen dem Maste die durch Fäule verloren gegangene Widerstandsfähigkeit wiederzugeben. Entweder wird das faule Ende abgeschnitten und durch den Eisenchaft (Fig. 132 a) ersetzt, oder der angegriffene Teil wird gesäubert und der Schaft übergezogen. Diese Art der Verstärkung wird hauptsächlich dann von Vorteil sein, wenn es sich um Gestänge handelt, welche sich im Betrieb befinden und bei denen eine Auswechslung der Maste grosse Schwierigkeiten bereiten würde. Die Art dieser Auswechslung ist aus Fig. 132 b leicht erkennbar. Der Mast wird durch die seitlichen Streben provisorisch verankert, das Erdreich wird aufgedrückt und dann der Schutzschaft übergeschoben.

Eisenmaste.

In den Fällen, in denen die Beanspruchung der Maste besonders gross ist, wenn auf bessere Ausstattung der Freileitung Gewicht gelegt wird, werden eiserne Maste verwendet.

Es werden Rohrmaste oder Gittermaste gewählt. Die ersteren sind zum Teil Mannesmannrohre, zum Teil mit besonderen seitlichen Rippen gewalzte Rohre. Gittermaste werden aus Flach-, Winkel und U-Eisen zusammengesetzt. Die Berechnung eines derartigen Mastes findet sich auf S. 138.

In Fig. 133 ist ein Mannesmann-Rohrmast dargestellt. Die Abmessungen und zulässigen Belastungen für diese sind in Tabelle No. 1 S. 129 wiedergegeben.

Um diese Maste in Gegenden aufstellen zu können, in denen aus Schönheitsrücksichten der nackte Mast nicht verwendet werden kann, sind besondere Zierköpfe, -Ringe und -Sockel anzuwenden, die in Fig. 125 abgebildet sind.

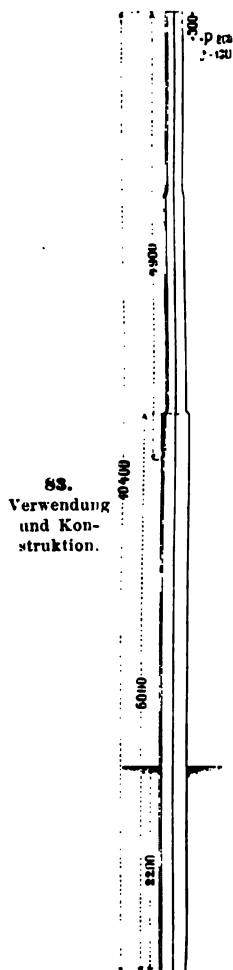


Fig. 133.

1) D. R.-G.-M. 141 026, ausgeführt von GEBR. STEUER, Dresden.

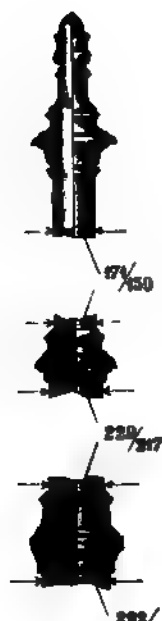
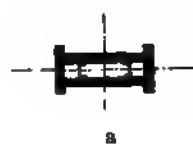


Fig. 134.



b

Fig. 135.





Fig. 137.

Tabelle No. 1.

Gewichte und Dimensionen von Mannesmann-Rehrmasten.

Masse des Abschnittes						Gesamt- länge in mm	P hori- zontaler Zug in kg	J zu- lässige Durch- biegung in mm	Gewicht ca. kg
oben		Mitte		unten					
innen	aussen	innen	aussen	innen	aussen				
98	108	130	140	161	171	8200	150	100	145
111	121	142	152	181	191	8200	225	100	180
130	140	168	178	206	216	8400	350	100	235
130	140	168	178	206	216	9200	225	120	230
141	152	192	203	243	254	8600	550	100	290
141	152	192	203	243	254	9400	550	120	350
159	171	217	229	280	292	9600	800	120	450
159	171	217	229	280	292	10400	800	130	575

Gittermaste können in mannigfachen Formen ausgeführt werden, von denen die gebräuchlichsten hier erwähnt sind:

1. hergestellt aus zwei -Eisen und Flacheisen-Diagonalen (Fig. 135 a),
2. hergestellt aus zwei -Eisen mit kurzen Blechverbindungen (Fig. 135 b) oder mit langen Blechverbindungen (Fig. 135 c),
3. hergestellt aus vier Winkeleisen und Flacheisen-Diagonalen (Fig. 136) oder eventuell solchen aus Winkeleisen.

Aus der nachstehenden Tabelle No. 2 (nach Angaben der Aktiengesellschaft Lauchhammer) können die Gewichte und zulässigen Beanspruchungen dieser Maste entnommen werden. Nach dem Gewicht derselben kann der Preis einigermaßen genau geschätzt werden.

Fig. 136 zeigt einen Mast, wie er von SCHUCKERT in der Centrale Stuttgart verwendet wurde und Fig. 137 einen Verteilungsmast der Centrale Sigmaringen.

Stangen in den Tropenländern.

84. Der Export der deutschen Elektrotechnik nach Tropenländern ist ein ganz gewaltiger und die Frage, was für Leitungsträger für die oft sehr langen Übertragungen verwendet werden sollen, eine ungemein wichtige. Es treten beim Leitungsbau in den Tropen ungemein viele Schwierigkeiten auf, so dass es wünschenswert erscheint, etwas näher hierauf einzugehen.

Stangen in
den Tropen.

Bei dem Bau der 252·6 km langen Telegraphenleitung Kilwa-Lindi-Mikidani in Deutsch-Ostafrika sind für das Gestänge einteilige Mannesmannröhren aus SIEMENS-MARTIN-Stahl von 6·5 m Länge und in salzigem Boden versuchsweise Stangen aus Boritiholz verwendet worden.

Mit Bezug darauf scheint das Gutachten des Ingenieurs Herrn R. von FISCHER, Treuenfeld, welcher als Telegraphenbaudirektor der Firma SIEMENS BROTHERS & Co., Ltd., London, reiche Erfahrungen im Bau tropischer Telegraphenleitungen hat, sehr bemerkenswert.

Danach bewähren sich seit circa 35 Jahren die zweiteiligen eisernen Gestänge, und zwar aus Gussrohr für den Erdboden und Stahlrohr für den oberen Stangenteil in den Tropen ganz besonders gut. Dagegen dürfte dies von einteiligen Stahlrohren weniger zu erwarten sein, da in der sogenannten Grundlinie Feuchtigkeit mit Trockenheit anhaltend wechseln und von der Hitze begünstigt ein lebhaftes Rosten und Durchfressen der Stangen wohl leicht erwartet werden kann. Bei Stangen mit gusseisernen Grundrohren dürften aber diese Missstände weniger leicht auftreten, zumal an Millionen derartiger von SIEMENS BROTHERS & Co. verwendeter Stangen jahrzehntelang wesentliche Beschädigungen nicht entstanden sind. Es wird auch von den Engländern mit ihrem ausgedehnten Betrieb in den Tropen ganz allgemein nur zweiteiliges Gestänge verwendet.

Auch die versuchsweise Anwendung von Stangen aus Boritiholz in salzhaltigem Boden scheint bedenklich! Es ist unmöglich, in Urwäldern, in denen der Weg mühsam gebaut werden und der Bau rastlos fortschreiten muss, erst zu untersuchen, ob Eisen- oder Holzmaste aufgestellt werden können. Der Bauunternehmer müsste ja immer erst eine chemische Analyse auf Salzgehalt vornehmen, bevor eine Stange aufgestellt wird. Abgesehen davon, dass das Arbeiten mit zweierlei Material bei entlegenen Fernstrecken

Tabelle No. 2.

Gewichte und zulässige Beanspruchung von Gittermasten.

Länge über Boden m	Gesamt- länge inkl. Boden- befestigung m	Zug kg	Gewichte in kg der Maste nach			
			Fig. 135 a	Fig. 135 b	Fig. 135 c	Fig. 136
6	7·5	100	166	183	184	168
		200	169	184	185	174
		300	172	185	186	198
		400	177	187	188	227
		600	242	255	245	288
		800	293	285	273	367
		1000	377	384	360	431
7	8·5	100	186	208	217	191
		200	197	210	219	198
		300	200	211	220	239
		400	231	241	251	267
		600	320	323	322	349
		800	375	385	368	453
		1000	429	436	419	562
8	9·6	100	213	229	239	215
		200	218	231	241	247
		300	221	233	243	277
		400	265	268	277	332
		600	360	362	357	411
		800	425	431	410	499
		1000	550	566	529	644
9	10·7	100	270	289	303	240
		200	276	291	305	277
		300	281	293	307	335
		400	292	295	309	351
		600	398	401	398	454
		800	534	540	520	573
		1000	612	627	591	697
10	11·8	100	294	317	338	272
		200	300	319	340	327
		300	305	321	342	368
		400	310	307	327	401
		600	438	442	444	524
		800	583	594	578	685
		1000	691	692	657	839
11	12·9	100	369	406	419	300
		200	377	410	424	367
		300	383	413	426	400
		400	390	396	410	454
		600	545	563	556	606
		800	639	639	632	855
		1000	848	836	808	932
12	14	100	434	442	490	341
		200	441	445	493	414
		300	453	430	481	481
		400	457	514	530	540
		600	608	610	606	680
		800	789	804	780	892
		1000	910	910	880	1043

Materialbeanspruchung: 1200 kg.

lästig ist, können, zumal bei dem schwierigen Transport, nicht zu unterschätzende Kosten und Verwirrungen verursacht und die richtige Verteilung der Stangen in Frage gestellt werden.

Berechnung der Leitungsmaste, Durchhang der Leitungen.¹⁾

33.
Belastung
der Maste
und
Leitungen.

Führt die Freileitung in gerader Linie, so findet bei ruhiger Luft eine Beanspruchung der Maste auf Biegung nicht statt, wenn die nach zwei Seiten abgehenden Drähte nahezu gleich gespannt sind. Das gleiche gilt, wenn von einem Verteilungspunkt nach allen möglichen Seiten Leitungen abzweigen, der resultierende Leitungszug aber mehr oder weniger nahe an Null liegt. Es findet hierbei nur eine senkrechte Belastung der Maste durch das Eigengewicht der Leitung und eines etwaigen Eisbelages statt. Die in Frage kommenden Gewichte der Leitungen können aus den Tabellen No. 7 bis 14, Hdb. VI, 1, S. 12 u. ff. entnommen werden.

Die Eisbelastung kann unter Umständen sehr bedeutend sein. HERZOG & FELDMANN berichten,²⁾ dass im Winter 1879 ein Eisendraht von 4 mm Durchmesser durch Eisbildung einen Durchmesser von 38 mm angenommen habe.

Die Beanspruchung der Gestänge durch die senkrecht wirkende Belastung wird durch die Formel³⁾ für Knickbelastung eines Stabes gegeben, dessen eines Ende eingespannt, dessen anderes frei ist.

$$P_k = \frac{\pi^2 E J}{4 L^3}.$$

Hierin bedeuten für unseren Fall:

L = die Länge des Mastes zwischen dem Fusspunkt und dem arithmetischen Mittel aus den Angriffspunkten der Leitungen;

E = den Elastizitätsmodul⁴⁾ des Stoffes in kg/cm²;

2 000 000 kg cm² für Schweisseisen in der Sehnensrichtung;

750 000 — 1 050 000 kg cm² für Gusseisen;

96 000 kg cm² für Kiefernholz, Feuchtigkeitsgehalt 18 %;

99 000 „ „ Fichte „ 19 %;

103 000 „ „ Eiche;

169 000 „ „ Buche;

J = das kleinste äquatoriale Trägheitsmoment des am Fusspunkt gelegenen gefährlichen Mastquerschnittes. Dasselbe ist für den kreisförmigen Querschnitt⁵⁾ einer Stange

$$J = 0.049 D^4$$

und für den ringförmigen Querschnitt

$$J = 0.049 (D^4 - d^4).$$

Bezüglich der zulässigen Belastung siehe S. 138.

1) Vgl. Hdb. XII, S. 698 f.; Zeitschrift für Elektrotechnik 1900, Heft 41.

2) HERZOG & FELDMANN, Elektrische Beleuchtung 1902, S. 147.

3) Hütte 1902, Teil I, S. 362.

4) Hütte 1902, Teil I, S. 349 f.

5) Über andere aber seltener vorkommende Querschnittsformen siehe GRAWINKEL und STRACKER, 6. Aufl., S. 24.

Seitlich wirkende Kräfte sind Winddruck und Leitungszug. Durch Winddruck,¹⁾ der in mittleren Breiten maximal mit 125 kg pro m² angenommen werden kann, treten erhebliche Gestängebelastungen auf. Derselbe wird bestimmt durch die Formel

$$P = 0.12248 F v^2 \text{ kg,}$$

worin F die senkrecht getroffene ebene Fläche und v die Windgeschwindigkeit bedeuten; hiernach ergeben sich die in Tabelle No. 3 gegebenen Belastungen:

Tabelle No. 3.

Windgeschwindigkeit in m/sec	Winddruck in kg für den qm senkrecht getroffener Fläche
v	P
10	12
20	49
30	110
40	196

Runde massive Leitungen und Maste bieten aber dem Winde keine ebenen, sondern zylindrische Flächen, so dass nur ein Teilbetrag der Schnittfläche, den wir mit 0.67 derselben in die Rechnung einsetzen, in Betracht kommt.²⁾ Bei viereckigen Gittermasten und bei verseilten Leitungen sind dagegen die vollen Flächen zu berücksichtigen, bei letzteren, weil sich in den einzelnen Windungen des Seiles der Wind fängt. Der Angriffspunkt des Windes liegt im Schwerpunkt der getroffenen Mastfläche, der mit genügender Genauigkeit in der Mitte des Mastes genommen werden kann.

Die Maste sind nun nicht zylindrisch, sondern kegelförmig. Die Zunahme des Durchmessers vom Zopf zum Fuss soll mindestens 1 cm auf jeden Meter betragen. Die Fläche F_1 eines Mastes ergibt sich somit, wenn d_1 den Durchmesser am Zopf, d_2 den am Fuss bedeutet, zu

$$F_1 = \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right) L$$

und das Biegemoment durch Winddruck auf einen runden Mast

$$P_m = 0.12248 F_1 \cdot a v^2,$$

worin a die Entfernung des Schwerpunktes vom Fusspunkt, für unseren Fall also halbe Mastlänge bedeutet.

Analog dem Vorstehenden ist der Winddruck auf die Leitungen zu berechnen.

Durch Windbelastung werden die Leitungen nun aus ihrer senkrechten Ruhelage abgetrieben. Den Abtrieb A aber kennen zu lernen, ist wichtig, weil hiernach auch die Entfernungen der Leitungen unter sich festgelegt werden können.

1) Näheres siehe Hütte 1902, Teil I, S. 261.

2) Nach D'AUBUISSON wird gesetzt: $P = 0.085 \cdot F^{1.1} \cdot v^2 \text{ kg.}$

Es gilt hierfür die Beziehung

$$M = \sqrt{P^2 + G^2},$$

wenn mit M die Resultierende aus dem nach unten strebenden Gesamtgewicht G der Leitung und dem horizontal wirkenden Winddruck P bezeichnet wird.

Es verhält sich aber auch

$$\frac{A}{f} = \frac{P}{M} \quad f = \text{Durchhang}$$

und hieraus ergibt sich dann

$$A = \frac{f P}{\sqrt{P^2 + G^2}}.$$

Die nachstehende Tabelle giebt die numerischen Werte des Abtriebes für eine Leitung von 8 mm Φ für verschiedene Spannweiten und eine Windgeschwindigkeit von 30 m an.

Tabelle No. 4.

30 m	40 m	50 m
$f = 0.9$ m	1.2 m	1.5 m
$P = 18$ kg	24 kg	30 kg
$G = 13.35$ "	17.80 "	22.3 "
$A = 0.724$ m	0.964 m	1.22 m

Der durch die Leitungen hervorgerufene seitliche Zug ergibt sich einmal aus dem Gewicht derselben und zweitens durch den Zug des gespannten Drahtes, der um so grösser ist, je straffer die Leitungen gespannt werden, je geringer also der Durchhang¹⁾ ist. Zug und Durchhang verändern sich mit der Temperatur.

86. Durchhang. Die bei der Durchhängung eines Drahtes, gleiche Höhenlage der Stützpunkte vorausgesetzt, entstehende Kurve ähnelt einer Parabel, bei welcher die folgenden Beziehungen bestehen.

Zieht man durch zwei Punkte A und B der Parabel, welche gleiche Entfernung vom Scheitelpunkt C haben, Tangenten, so hat der Schnittpunkt derselben D vom Scheitelpunkt der Parabel dieselbe Entfernung, wie dieser von der durch A und B gezogenen Geraden. Der Durchhang ist also

$$f = CD = CE.$$

Er berechnet²⁾ sich zu

$$f = \frac{g l^2}{8 S}.$$

Die Länge des Drahtes ergibt sich aus der Parabelgleichung zu

$$L_D = l + \frac{8 f^3}{3 l},$$

1) Näheres über den Durchhang siehe: ETZ 1894, S. 437, HERZOG; ETZ 1902, S. 593, KROHNE; ETZ 1903, S. 37, 174, OTTO; ETZ 1903, S. 109, 212, KROHNE; ETZ 1903, S. 255, v. GLINSKI; ETZ 1903, S. 802, SENDEL; Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1899, S. 199.

2) Näheres siehe BLAVIER, Nouveau traité de Télégraphie électrique, Bd. 2.

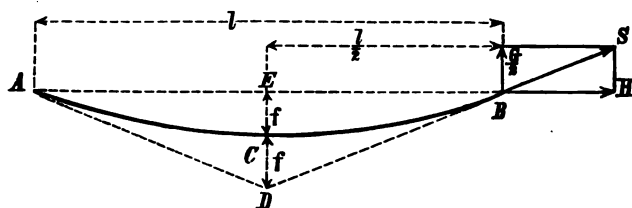


Fig. 138.

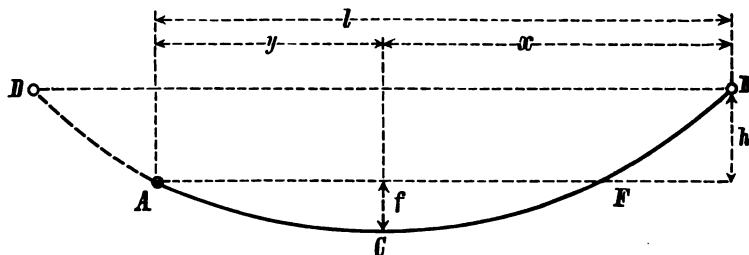


Fig. 139.

worin g das Gewicht der Leitung für den laufenden Meter, l die Entfernung zwischen den Aufhängepunkten und S die Spannung des Drahtes am tiefsten Punkt bedeuten.

Die Leitungen werden nun stets so gespannt, dass der Durchhang etwa $2-2\frac{1}{2}\%$ der Mastentfernung beträgt; in seltenen Fällen wird $f = 3\%$ l gewählt. Die Zugspannung im Draht beträgt am tiefsten Punkt unter alleiniger Berücksichtigung des Gewichtes

$$S = \frac{gl^2}{8f} \text{ kg.}$$

An den Aufhängepunkten ist die Spannung grösser und zwar um $g \cdot f$ kg, so dass sich für diese Punkte ergibt

$$S_1 = \frac{gl^2}{8f} + g \cdot f \text{ kg.}$$

Befinden sich die Stützpunkte A und B in verschiedener Höhenlage (Fig. 139), so liegt der tiefste Punkt des durchhängenden Drahtes demjenigen Stützpunkt näher, der tiefer liegt. Er rückt ihm um so näher, je grösser die Höhendifferenz ist. Der Durchhang wird unter Inanspruchnahme der Hilfsparabel DCB und ACE bestimmt und ergibt sich in der Entfernung z von A

$$z = \frac{gl^2 + 2hS}{2gl}$$

und x von B .

$$x = \frac{gl^2 - 2hS}{2gl}.$$

Ist z berechnet, so kann aus der oben angegebenen Formel f der Parabel ACE bestimmt werden.

Wichtig ist der Einfluss der Temperatur. Da sich der Draht mit zunehmender Erwärmung ausdehnt, so wird der Durchhang f grösser und die

Spannung S geringer. Die Gestänge werden also entlastet, dagegen der Abtrieb grösser. Bei abnehmender Temperatur verkürzen sich die Leitungen und die mechanische Spannung steigt rasch. Beim Spannen muss daher der Durchhang so gewählt werden (siehe Tabelle No. 5 und 6), dass bei der niedrigsten Temperatur, welche am Montageort erwartet werden kann, das Leitungsmaterial mechanisch nicht mehr belastet wird, als zulässig. Dass hierbei die bereits erwähnten atmosphärischen Einflüsse (Schnee und Eisbelastung, Winddruck) berücksichtigt werden müssen, ist klar. Welche Belastung zulässig ist, sagen die Sicherheitsvorschriften: Leitungen dürfen bei minus 20° C. mit fünffacher, solche aus hartgezogenem Material mit dreifacher Sicherheit beansprucht werden.

Wird ein Körper von einer bestimmten Länge l_a um t° C. erwärmt, so wird seine Länge

$$l_t = l_a (1 + \alpha t).$$

Für α (lineare Ausdehnungskoeffizient) ist zu setzen für:

Aluminium	0.00002180
Bronze	0.00002848
Eisendraht	0.00001235
Kupfer	0.00001643
Stahldraht	0.00001079.

Hierzu kommt jedoch noch die Dehnung des Drahtes; für diese im Zusammenhang mit der linearen Ausdehnung geben HERZOG und FELDMANN¹⁾ die Formeln:

$$t = \frac{l^2 \xi^2}{24 \beta} \left(\frac{1}{p_t^2} - \frac{1}{p_0^2} \right) - \frac{\lambda}{\beta} (p_t - p_0)$$

$$t = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{8}{3} \cdot \frac{f}{l^2} - \frac{\lambda \xi}{8} \cdot \frac{l^2}{f} \right) - \left(\frac{l^2 \xi}{24} \cdot \frac{1}{p_0^2} - \lambda p_0 \right) \right]$$

worin bedeuten:

- f = Durchhang bei der Temperatur t ,
- l = Entfernung der Aufhängepunkte,
- λ = spez. Dehnung pro 1 kg Zugspannung,
- β = spez. Dehnung pro 1° C.,
- ξ = spez. Gewicht,
- p_0 = 4 kg pro mm^2 zulässige spez. Spannung bei -20° C.,²⁾
- p_t = spez. Spannung bei t° C. (gezählt von -20° C. an).

Um den gewünschten Durchhang der Leitungen zu erreichen, werden an den Masten in der Höhe der Aufhängungen Zeichen angebracht, von denen nach unten die senkrechte Projektion des tiefsten Punktes des durchhängenden Drahtes auf den Mast abgetragen und gekennzeichnet wird (Fig. 141). Beim Spannen der Drähte ist darauf zu achten, dass der Scheitel der durch den Draht gebildeten Parabel in die von den Kennzeichen gebildete Visierlinie fällt.³⁾

1) Handbuch der elektrischen Beleuchtung 1901, S. 145.

2) ETZ 1894, S. 437; 1897, S. 147; 1896, S. 721; 1897, S. 395.

3) Vgl. auch ETZ 1900, S. 768.

hhang

40°
58
90

40°
44
50

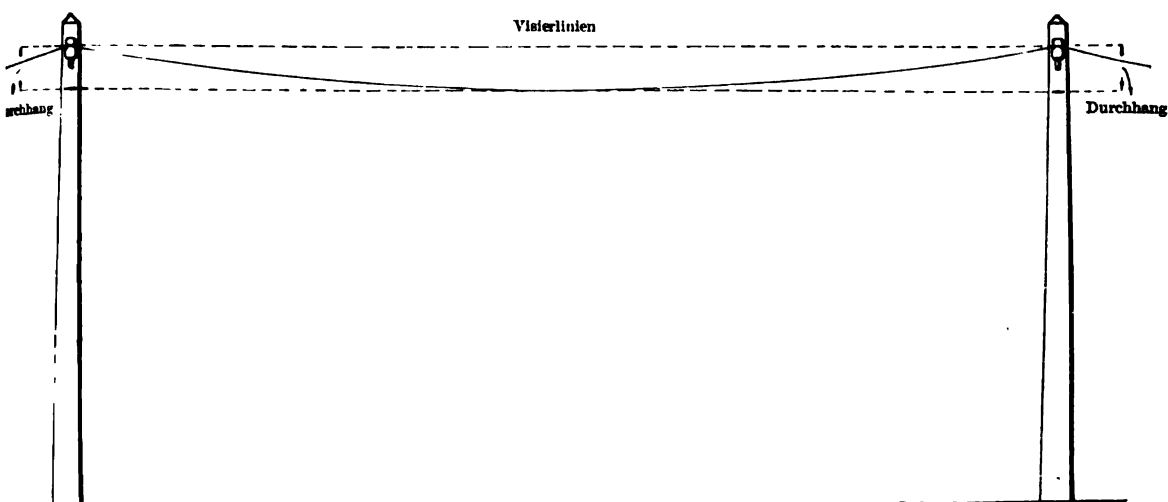


Fig. 141.

Es kann nun zwar der Durchhang für die verschiedenen Querschnitte und Temperaturen berechnet werden; für den Monteur ist dies jedoch zu zeitraubend. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft hat daher die folgenden Tabellen No. 5 und No. 6 aufgestellt, auf Grund deren die Leitungen gespannt werden. Für die Praxis genügen diese angenäherten Werte, die allerdings eine höhere Belastung des Leitungsmaterials vorsehen, als nach obiger Formel von HERZOG & FELDMANN möglich, vollkommen.

Tabelle No. 5.

Durchhang bei Kupferleitungen.

Spannweite	10 m				20 m				30 m				40 m				50 m			
Temperatur in Grad Celsius	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°
Durchhang für Leitung bis 25 mm²	0.020	0.025	0.030	0.035	0.08	0.09	0.112	0.115	0.18	0.19	0.20	0.22	0.30	0.33	0.35	0.40	0.48	0.50	0.55	0.58
Durchhang für Leitung bis 120 mm²	0.080	0.085	0.040	0.045	0.10	0.14	0.16	0.18	0.25	0.27	0.30	0.32	0.45	0.50	0.54	0.60	0.75	0.80	0.84	0.90

Tabelle No. 6.

Durchhang bei Aluminiumleitungen.

Spannweite	10 m				20 m				30 m				40 m				50 m			
Temperatur in Grad Celsius	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°	-20°	0°	+20°	+40°
Durchhang für Leitung bis 42 mm²	0.015	0.015	0.015	0.020	0.05	0.06	0.06	0.07	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20	0.24	0.26	0.28	0.32	0.34	0.40	0.44
Durchhang für Leitung bis 197 mm²	0.015	0.020	0.020	0.025	0.05	0.06	0.07	0.08	0.14	0.15	0.16	0.18	0.26	0.28	0.30	0.32	0.37	0.41	0.45	0.50

87.
Zulässige
Gestänge-
belastung.

Damit die Gestänge nicht brechen, darf höchstens gesetzt werden

$$P_k L = k W,$$

worin k die höchst zulässige Beanspruchung des Materials und W das Widerstandsmoment des Mastquerschnittes bedeutet.

$$\text{Für den kreisförmigen Querschnitt ist } W = \frac{\pi}{32} D^3,$$

$$\text{" " ringförmigen " " } W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}.$$

Die Gestänge dürfen aber nicht bis zur Bruchbelastung in Anspruch genommen werden, und zwar pflegt man bei Holzmasten mit der 10fachen, bei Eisen mit der 5fachen Sicherheit zu rechnen.

Die Sicherheitsvorschriften des V.D.E. schreiben über die Festigkeit der Niederspannungsgestänge nichts vor, da sie mehr für die Sicherheit des Betriebes, nicht aber für die gegen Feuer- und Lebensgefahr in Frage kommen.¹⁾

Für Hochspannung dagegen gelten die oben angegebenen Werte.²⁾

Für Winkelpunkte ergibt sich die Resultierende aus den Leitungszügen nach dem Parallelogramm der Kräfte zu

$$R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2 P_1 P_2 \cos \alpha}.$$

Hieraus wird, wenn $P_1 = P_2$ ist, die Leitungen also gleich gespannt sind:

$$R = 2 P \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Da die Drahtspannungen den oben angegebenen Grenzwert $\frac{k W}{L}$ nicht übersteigen dürfen, so ergibt sich

$$\frac{k W}{L} = 2 P \cos \frac{\alpha}{2},$$

$\cos \frac{\alpha}{2}$ ist aber $= \frac{l}{2r}$, wenn l der Mastenabstand und r der Radius der Kurve und hieraus ergibt sich dann der zulässige Mastenabstand in Kurven zu:

$$l = \frac{r k W}{P L}.$$

88.
Dimen-
sionierung
der Maste.

Die übrigen für die Dimensionierung eiserner Maste erforderlichen Daten können am besten an Hand eines Beispiels besprochen werden.

Verlangt werde ein Leitungsmast, welcher nach Skizze No. 142 beansprucht werde. Der eine Mast ist 30, der andere 40 m entfernt. Der Leitungswinkel betrage 135° . Es soll ein Kupferdraht von 70 mm^2 verlegt werden. Der Durchhang betrage höchstens $3\frac{0}{10}$ der freien Länge.

Für die Strecke von 30 m gilt nun folgendes:

Die Länge des Drahtes, berechnet nach der Formel für L_D (S. 134) beträgt 30.07 m , sein Gewicht bei einem spez. Gewicht von $9 - 18.94 \text{ kg}$.

Da der Durchmesser des Drahtes 9.45 mm beträgt, so ist infolgedessen die dem Winde gebotene Fläche

$$0.00945 \times 30.07 = 0.284 \text{ m}^2,$$

1) Dr. C. L. WEBER, Erläuterungen, 6. Aufl., S. 90, und ETZ 1905, S. 155.

2) § 231 der Hochspannungsvorschriften.

da aber nur das 0·67fache der Projektion des Zylinders wirksam ist, so kommen nur

$$0·67 \cdot 0·284 = 0·19 \text{ m}^2$$

in Betracht. Bei 125 kg Winddruck pro m^2 ergibt sich für den Draht

$$0·19 \cdot 125 = 23·75 \text{ kg.}$$

Für die Strecke von 40 m ergibt sich

Länge des Drahtes	40·10 m
Gewicht des Drahtes	25·26 kg
Winddruck	31·7 „

Bezeichnen nun Q die Summe von Eigengewicht und Winddruck, so ergibt sich nach Fig. 138 zwischen der Auflagerreaktion $\frac{Q}{2}$ und der Horizontalspannung H die Beziehung

$$\frac{Q}{2} : H = 2f : \frac{l}{2}.$$

Es ist demnach

$$H = \frac{Q \cdot l}{8 \cdot f}$$

und die Totalspannung im Draht, S_r = der Resultierenden aus $\frac{Q}{2}$ und H :

$$S_r = \sqrt{\left(\frac{Q}{2}\right)^2 + H^2}.$$

Für unseren Fall ergibt sich daher für die Strecke von 30 m:

$$H = \frac{Q \cdot l}{8 \cdot f} = \frac{(18·94 + 23·75) \cdot 30}{8 \cdot 0·9} = 177·8 = \sim 178 \text{ kg}$$

und

$$S = \sqrt{\left(\frac{42·69}{2}\right)^2 + 178^2} = \sim 180 \text{ kg.}$$

Für die Strecke von 40 m ergibt sich

$$\begin{aligned} H_1 &= \sim 237 \text{ kg,} \\ S_1 &= \sim 239 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Unter der Annahme, dass die beiden Drähte einen Winkel von 135° bilden, ergibt sich am einfachsten graphisch aus dem Parallelogramm der Kräfte die auf den Mast resultierend wirkende Kraft zu

$$P = \sim 152 \text{ kg.}$$

In der Praxis wird man jedoch den Wert auf 200 kg abrunden.

Nach den Regeln der Festigkeit besteht nun unter Berücksichtigung umstehender Skizze folgende Bedingung:

$$W = \frac{H \cdot L}{k_b} + \frac{H_1 \cdot L_1}{k_b},$$

worin bedeutet:

W = Widerstandsmoment am gefährlichen Querschnitt x ,

L = wirksamer Hebelarm von P ,

P_1 = der auf den Mast wirkende Winddruck,

L_1 = wirksamer Hebelarm von $P_1 = x S$, = Abstand des Schwerpunktes der Mastfläche vom Erdboden.

Je nach Wahl des Mastes wird sich nun ein erforderliches Widerstandsmoment am gefährlichen Querschnitt ergeben und hieraus die erforderlichen Dimensionen.

Es sei für unseren Fall ein quadratischer Winkeleisenmast vorgeschrieben, eine Aufhängungshöhe des Drahtes von 6·5 m, bei einer Länge des Mastes über Erde von 7 m.

Bei einer Materialbeanspruchung von 1200 kg per Quadratcentimeter würde das erforderliche Widerstandsmoment $W = 140 \text{ cm}^3$ betragen, welchem vier Winkeleisen $40 \times 40 \times 4 \text{ mm}$ im Abstände von 325 mm genügen (Fig. 144).

Bei weniger beanspruchten Masten werden Diagonalen aus Flacheisen hergestellt, während bei stärkeren Masten Winkeleisen zur Verwendung kommen.

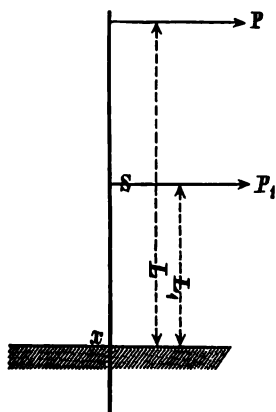


Fig. 142.

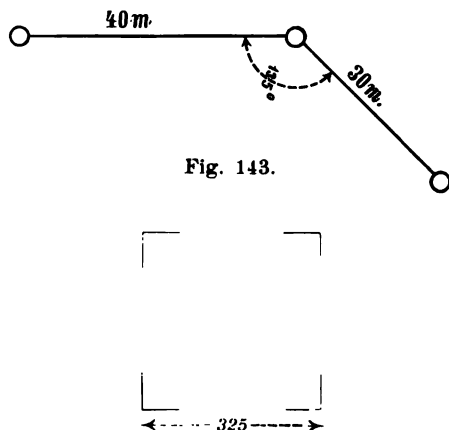


Fig. 143.

Fig. 144.

Wenn sich die Leitungszüge gegenseitig nahezu aufheben, was auf gerader Strecke nahezu stets geschieht, so wird unter ungünstigen Verhältnissen diejenige Beanspruchung des Mastes in die Rechnung eingeführt werden müssen, welche auftritt, wenn der Draht auf einer Seite reisst.

Isolatorenträger.

89.
Eiserne
Stützen.

Die Isolatoren werden auf besonderen Stützen befestigt, die aus Eisen, seltener aus Holz bestehen.¹⁾

Im wesentlichen richtet sich die Form der Isolatorstütze nach der Art der Tragkonstruktion. Die Stütze ist ein gerader Bolzen, sobald die Befestigung auf einem Querbalken aus Holz oder Eisen erfolgt. Auch ein hakenförmiger Bügel, der im vertikalen Teile zwei Löcher für Holzschrauben hat, dient als Stütze, deren Befestigung mittels einiger Schrauben unmittelbar am Mast erfolgen kann. Einfacher ist die Befestigung bei der Schrauben- oder Hakenstütze, welche 1857 mit den BORGGREVE-Glocken zum erstenmal eingeführt wurde.²⁾

1) Siehe S. 147 und 158.

2) Hdb. XII, S. 620.

.

—

FD
—

—

Je nach Wahl des Mastes wird sich nun ein erforderliches moment am gefährlichen Querschnitt ergeben und hieraus die Dimensionen.

Es sei für unseren Fall ein quadratischer Winkeleisenmast v eine Aufhängungshöhe des Drahtes von 6·5 m, bei einer Län über Erde von 7 m.

Bei einer Materialbeanspruchung von 1200 kg per Qu würde das erforderliche Widerstandsmoment $W = 140 \text{ cm}^3$ bet vier Winkeleisen $40 \times 40 \times 4 \text{ mm}$ im Abstände von 32 (Fig. 144).

Bei weniger beanspruchten Masten werden Diagonalen hergestellt, während bei stärkeren Masten Winkeleisen kommen.

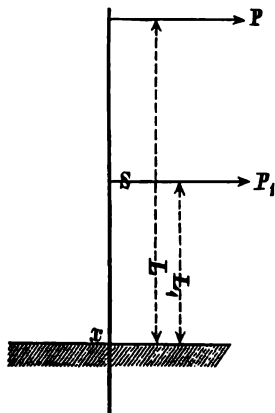


Fig. 142.

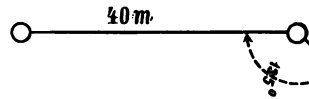


Fig. 143.

← 325 →

Fig. 144.

Wenn sich die Leitungszüge gegenseitig nahe gerader Strecke nahezu stets geschieht, so wird in hältnissen diejenige Beanspruchung des Mastes in d werden müssen, welche auftritt, wenn der Draht auf

Isolatorenträger.

89.
Eiserne
Stützen.

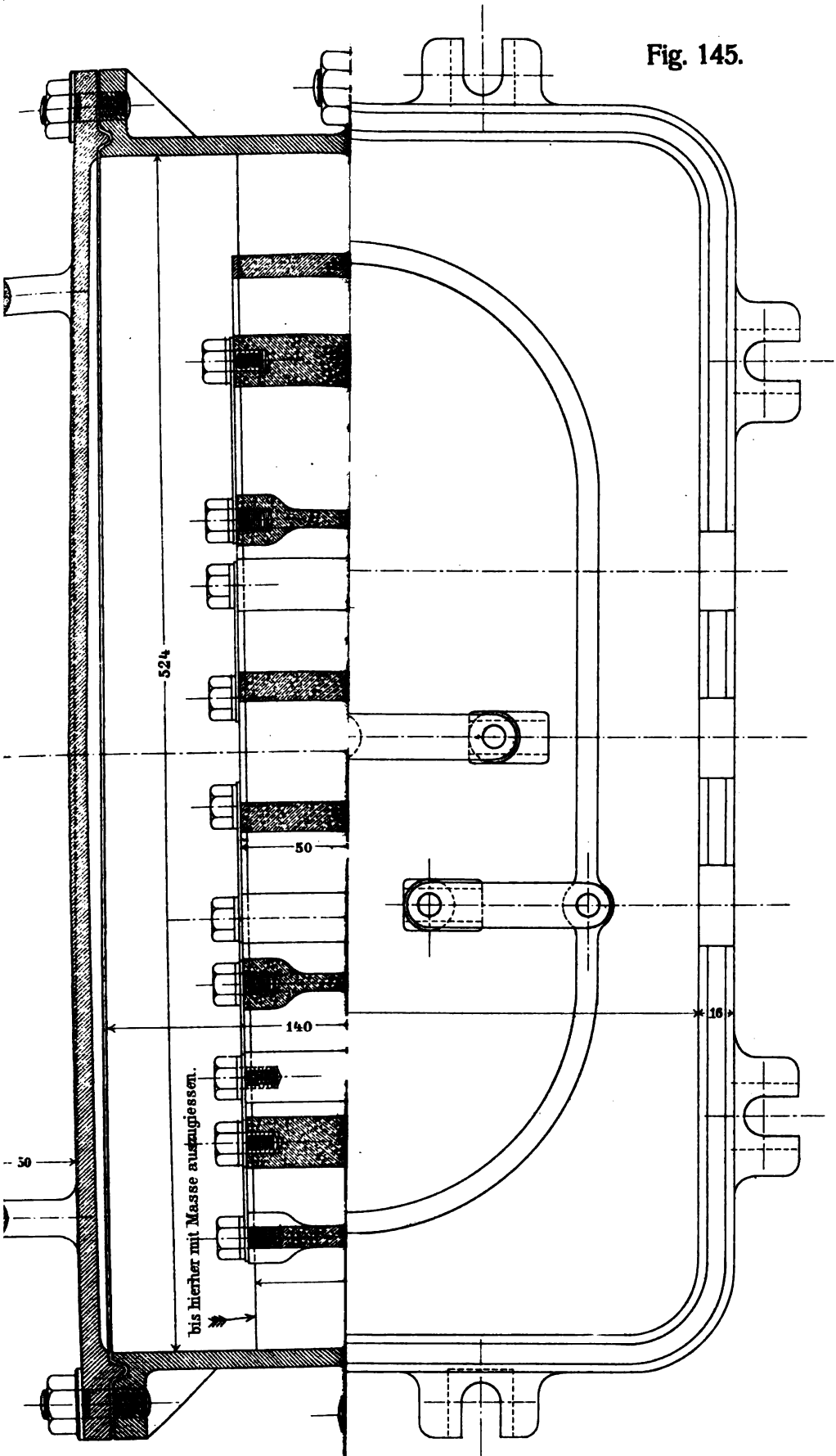
Die Isolatoren werden auf besonderen Stützen b seltener aus Holz bestehen.¹⁾

Im wesentlichen richtet sich die Form der Isolat der Tragkonstruktion. Die Stütze ist ein gerader B festigung auf einem Querbalken aus Holz oder Eisen e förmiger Bügel, der im vertikalen Teile zwei Löcher hat, dient als Stütze, deren Befestigung mittels einiger b bar am Mast erfolgen kann. Einfacher ist die Befestigung : oder Hakenstütze, welche 1857 mit den BORGGREVE-Glocken eingeführt wurde.²⁾

1) Siehe S. 147 und 158.

2) Hdb. XII, S. 620.

Fig. 145.



em.

Die üblichsten Stützen zeigt Fig. 148. In Tabelle No. 7 sind nach den Angaben der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, die bei dieser üblichen Stützdimensionen eingetragen, und zwar sind in Tabelle a und b diejenigen der normalen in zwei Grössen, in Tabelle c und d die der verstärkten Stützen, ebenfalls in zwei Modellen, enthalten.

Die normalen Stützen finden stets auf geraden Strecken Anwendung, wo sich die Leitungszüge nahezu aufheben, die verstärkten dagegen an Winkelpunkten oder überhaupt da, wo die Stütze stark auf Zug beansprucht wird.

Als Abspannstützen anderer Form finden die in Fig. 149 gezeichneten Verwendung. Ist es nicht möglich, eine seitliche Befestigung der Stützen zu erreichen, so bieten Deckenstützen mit einem, zwei oder auch drei Armen ein bequemes Hilfsmittel, hauptsächlich aber in grossen Hallen, Bahnhofsüberdachungen oder dergl. (Fig. 150).

Für die vielfach verwendeten SHAKLE-Isolatoren findet die in Fig. 151 wiedergegebene Befestigungsweise Anwendung.

Tragkonstruktionen, Gestänge und Traversen.

An den Masten werden die auf gebogenen Stützen befestigten Isolatoren direkt eingeschraubt, wobei die oberste Stütze 30 cm von der Spitze entfernt bleibt. Sie werden dann abwechselnd auf beiden Seiten angeordnet. Durch dieses Übereinandersetzen wird aber eine sehr grosse Bauhöhe bedingt, so

90.
Befestigung
der Stützen
und Traver-
sen an
Masten.

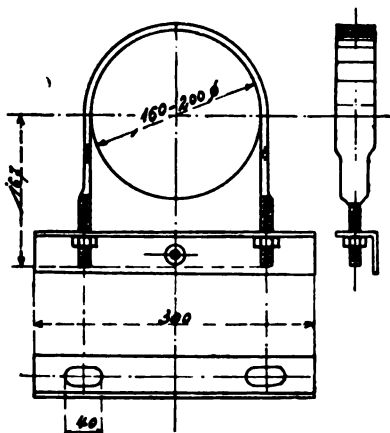


Fig. 146.

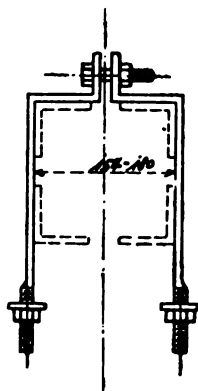


Fig. 147.

dass sehr lange Masten nötig werden, um die erforderlichen Entfernungen zwischen dem untersten Leiter und der Erde und zwischen den einzelnen Leitungen unter sich innehalten zu können. Es werden daher auf diese Art höchstens 6—8 Leitungen auf jeder Mastseite untergebracht. Bei einer grösseren Anzahl werden am Mast Traversen angeordnet, die aus Eisen, aber auch aus Holz sein können. Letzteres wird in Deutschland seltener, in Amerika häufig angewendet. Bedauerlicherweise wird die Befestigung der Traversen am Mast aber häufig so ausgeführt, dass der letztere eingeschnitten wird, um der Traverse Halt zu geben, ausserdem wird dann noch ein Bolzen durchgezogen, so dass der Querschnitt des Mastes mehrfach geschwächt wird.

Tabelle No. 7.

Normale Stützen. a) Grösse I.

Art	Gewicht in kg	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·3	60	30	80	35	13	1 1/2"
" " kurzem "	0·215	40	10	80	35	13	1 1/2"
gebogen, mit langem "	0·59	80	5 1/8"	45	35	13	93
" " kurzem "	0·55	50	5 1/8"	45	35	13	93
" " Holzschraube	0·41	100	16	45	35	13	93
" " Steinschraube	0·48	120	16	45	35	13	93
Hakenstütze	0·52	60	5 1/8"	70	35	13	93

b) Grösse II.

Art	Gewicht in kg	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·50	80	40	110	50	16	3 1/8"
" " kurzem "	0·45	50	10	110	50	16	3 1/8"
gebogen, mit langem "	0·75	105	5 1/8"	60	50	16	110
" " kurzem "	0·66	65	5 1/8"	60	50	16	118
" " Holzschraube	0·54	130	16	60	50	16	118
" " Steinschraube	0·625	140	16	60	50	16	118
Hakenstütze	0·91	80	3 1/4"	110	50	16	118

Verstärkte Stützen. c) Grösse I.

Art	Gewichte	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·36	65	35	80	35	13	1 1/2"
" " kurzem "	0·26	35	10	80	35	13	1 1/2"
gebogene, mit langem "	0·55	90	5 1/8"	45	35	13	93
" " kurzem "	0·50	60	5 1/8"	45	35	13	93
" " Holzschraube	0·54	110	16	45	35	13	93
" " Steinschraube	0·51	120	16	45	35	13	93
Hakenstütze	0·66	75	5 1/8"	70	35	13	93

d) Grösse II.

Art	Gewichte	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·65	75	35	100	50	16	3 1/8"
" " kurzem "	0·60	50	15	100	50	16	3 1/8"
gebogene, mit langem "	1·14	120	3 1/4"	60	50	16	120
" " kurzem "	1·05	85	3 1/4"	60	50	16	120
" " Holzschraube	0·70	120	20	60	50	16	120
" " Steinschraube	0·75	140	20	60	50	16	120
Hakenstütze	1·035	80	3 1/4"	95	50	16	120

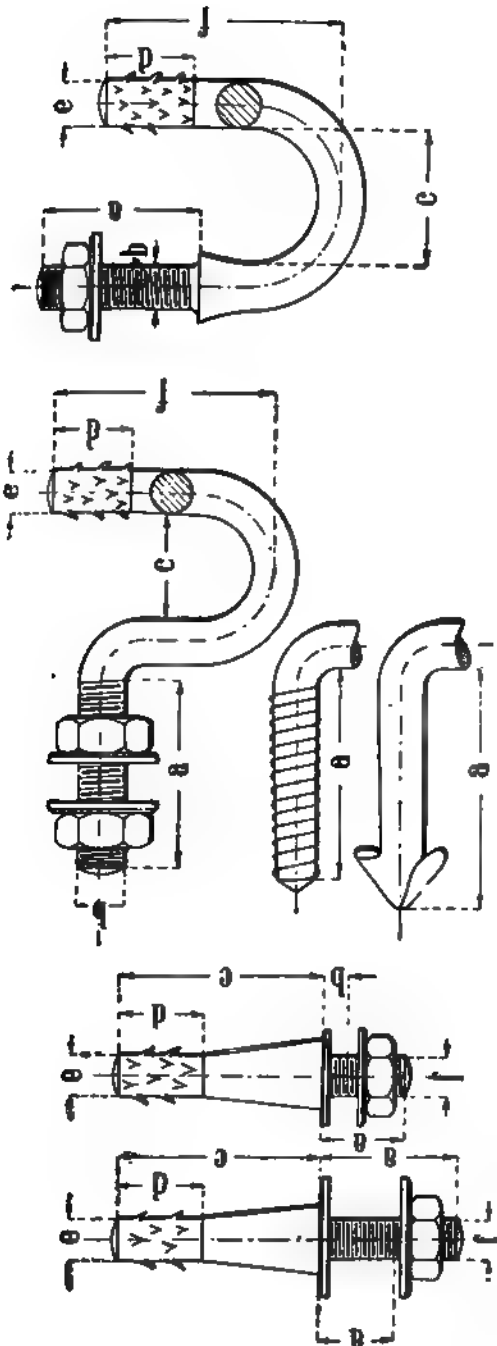


Fig. 148.

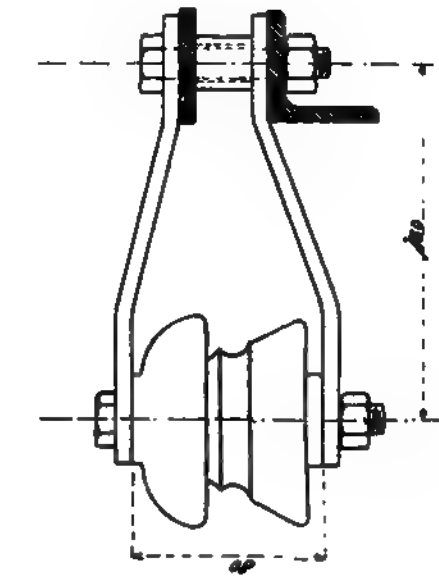


Fig. 151.

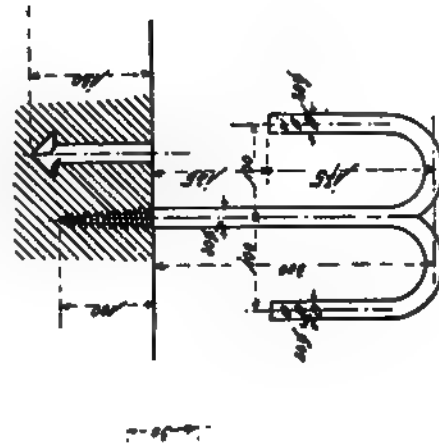


Fig. 150.



Fig. 152.

Es empfiehlt sich daher, die Traversen mit Hilfe von Ziehbändern am Mast zu befestigen, die dem Mastquerschnitt entsprechend rund (Fig. 146) oder viereckig (Fig. 147) ausgeführt werden. Letztere Art ist besonders zum nachträglichen Anbringen von Traversen an eisernen Masten üblich. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft verwendet Universalziehbänder, deren Bügel verschiebbar ist und infolgedessen für verschiedene Mastquerschnitte ausreicht. Das in Fig. 152 a gezeichnete Modell reicht für Maste von 75

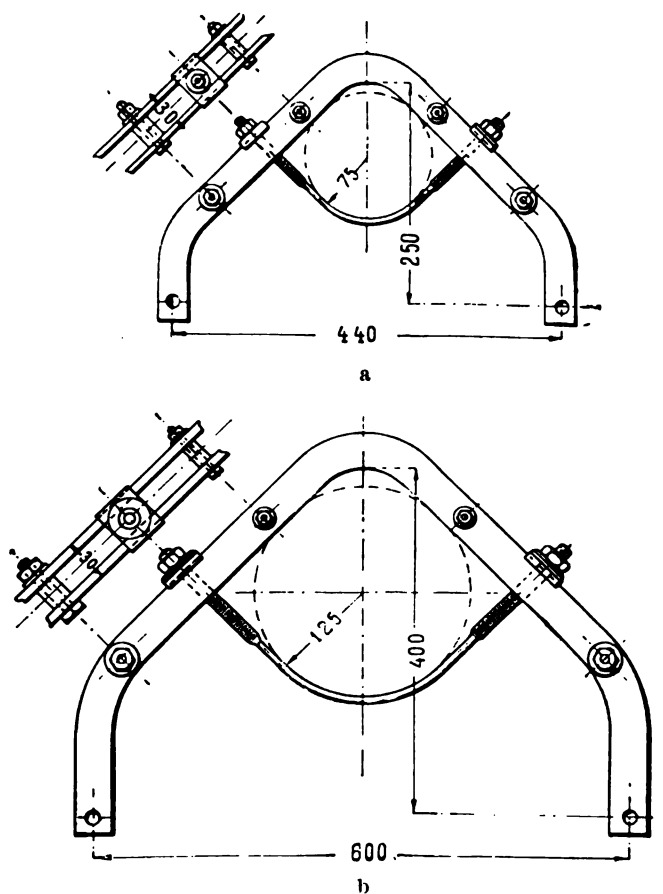


Fig. 152.

bis 125 und das in Fig. 152 b wiedergegebene für solche von 125 bis 220 Zopfdurchmesser.

Die eisernen Traversen bestehen aus Winkel- oder U-Eisen, wie dies auch aus den Zeichnungen Fig. 153 a und b hervorgeht. Laden die Traversen weit aus, so werden sie an ihren Endpunkten noch miteinander verbunden und durch schräg nach dem Mast laufende Stützen versteift.¹⁾

An Gebäuden können die Isolatorstützen, wenn nur wenige Leitungen zusammenliegen, direkt am Mauerwerk übereinander angeordnete Streber halten (Fig. 154).

1) Vgl. auch S. 146, Gestänge der SIEMENS-SCHUCKERT Werke, Wien.

Auch die in Fig. 155 a und b wiedergegebenen Rohrgestänge bieten eine bequeme Montage. Die Isolatorenstützen sind zu Schellen ausgebildet, mit denen sie das Rohr umfassen. Durch die Wahl anderer doppelseitiger

91.
Gestänge.

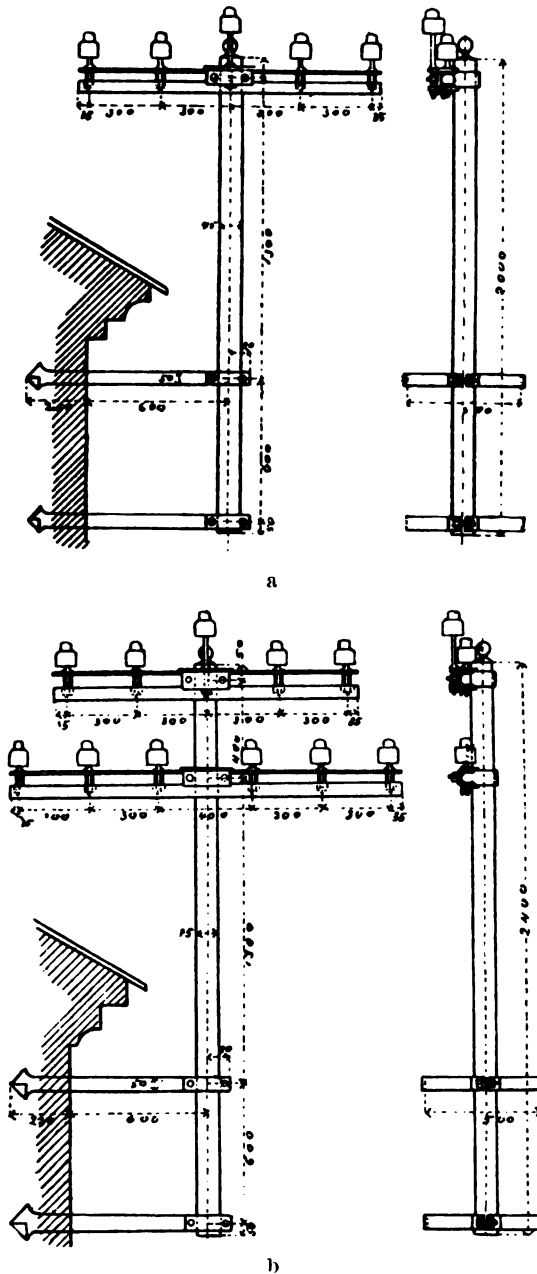


Fig. 153.

Schellen-Isolatorenstützen (Fig. 156 a und b) kann die Anzahl der an einem Rohr angebrachten Isolatoren nachträglich erhöht werden. Statt der Stützen mit Schellen können auch (Fig. 155 a) solche verwendet werden, die mit

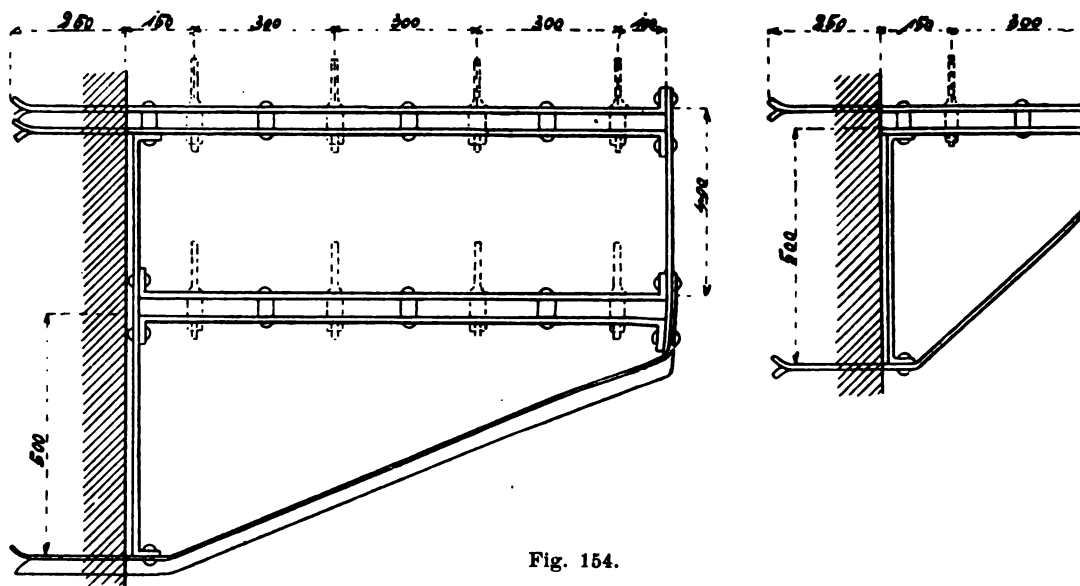


Fig. 154.

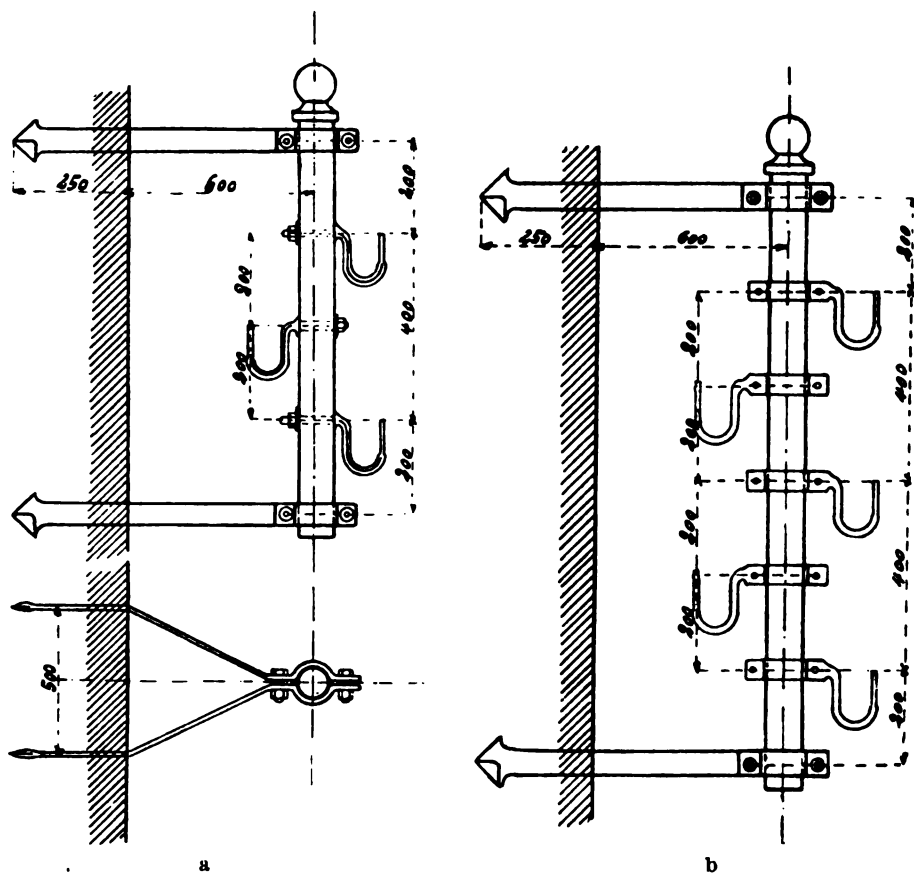


Fig. 155.

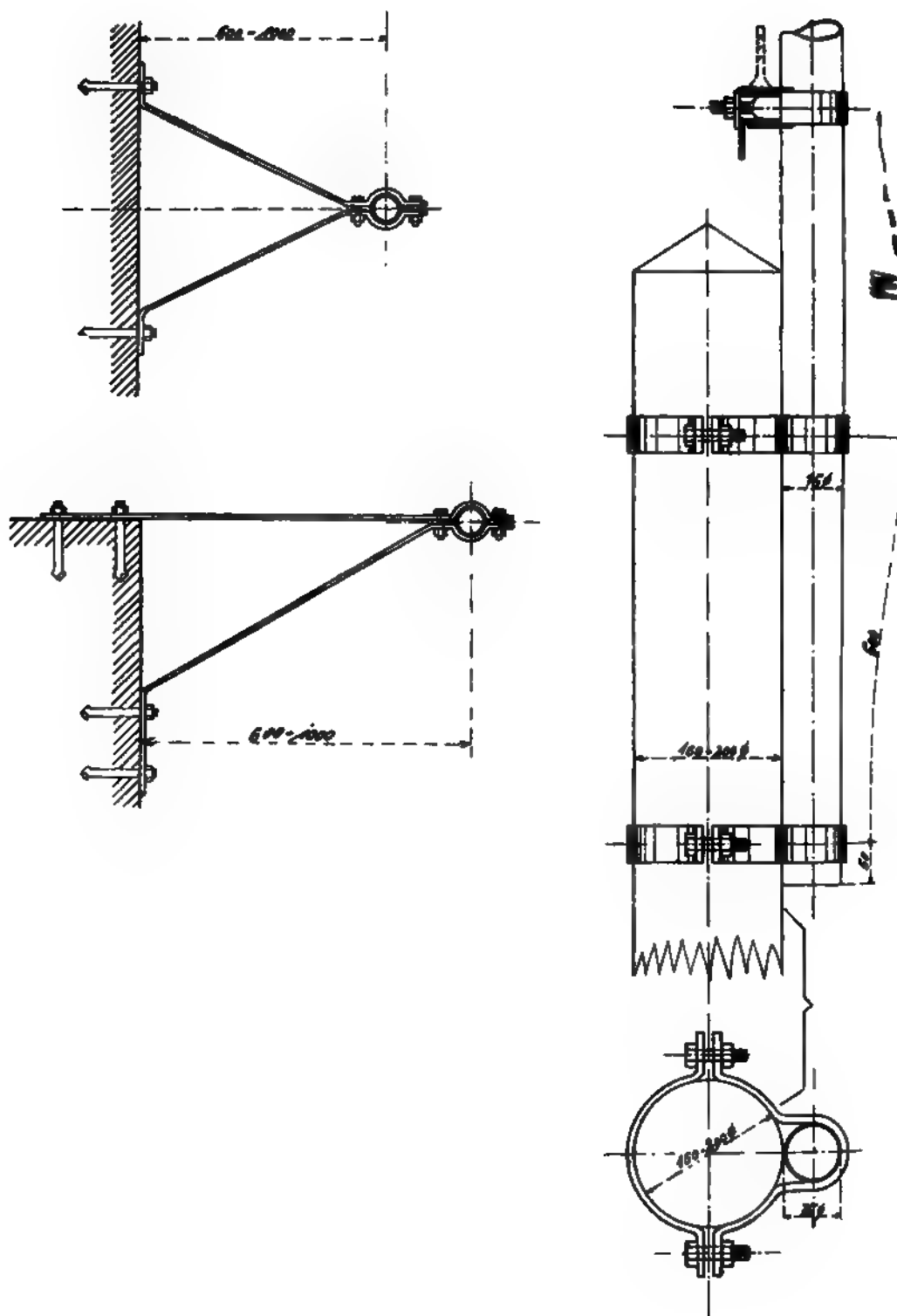


Fig. 158.

Diese Bolzen werden gewöhnlich aus Akazien-, Eichen- oder Eukalyptusholz hergestellt und meistens sorgfältig mit heissem Asphalt, Paraffin- oder Leinöl behandelt, damit die Isolierfähigkeit durch Atmosphärrillen weniger beeinflusst wird.

Sie bewähren sich bei Verwendung mit Glas- oder gutglasierten Porzellanisolatoren bei Spannungen von 25—30 000 Volt sehr gut; ungewöhnliche Bolzenzerstörungen kamen bei diesen Spannungen selten vor und konnten teilweise auf poröse oder zerbrochene Isolatoren zurückgeführt werden.

Diese guten Erfolge¹⁾ sind allerdings in erster Linie wohl der guten Isolation der Isolatoren zu verdanken und weniger der Isolierung durch die hölzernen Bolzen. Doch haben die für 40 000 Volt und höhere Spannungen von einem Fabrikanten hergestellten Isolatoren nicht den gleichen Sicherheitsfaktor wie die von demselben Fabrikanten offerierten Isolatoren für niedrigere Spannungen. Das Durchbrennen der Bolzen bei 10—30 000 Volt-Isolatoren ist, da dieselben in der Regel sehr kleine Oberflächenstromverluste zeigen, bei diesen Spannungen verhältnismässig selten. Mehr oder weniger häufige Bolzendurchschläge kommen nur an Orten, in denen salzige Winde oder starke Seenebel auftreten, oder in der Nähe chemischer Fabriken vor, und zwar unabhängig von der verwendeten Isolatorart oder der vorhandenen Spannung. Bei einer Anlage kamen z. B. grosse Störungen infolge Durchbrennens der Bolzen vor, trotzdem in derselben bei 440 Volt Spannung Isolatoren für 10 000 Volt verwendet worden waren. Diese Störungen hatten ihre Ursache in Niederschlägen auf die Isolatoren aus einer benachbarten chemischen Fabrik. Sobald Regen eintrat, kamen keine Durchschläge vor. Kennt man die Ursache derartiger Fälle, so ist eine Abhilfe jedoch leicht möglich.

Bei 40- und 50 000 Volt-Anlagen tritt der Bolzendurchschlag anders auf. Scheidet man all die durch zerbrochene oder unvollkommene Isolatoren verursachten Stromverluste aus, so ist der wirklich auf der Oberfläche und durch den Bolzenkörper fliessende Strom sehr gering. Auffallend ist jedoch, dass ein Durchschlagen des Holzgewindes gegen die Eisentraverse in vielen Fällen erfolgt, die Isolatoren dabei aber fast nie beschädigt werden; auch kein Querträger wurde von dem über die Oberfläche der Isolatoren verloren gegangenen Strom verbrannt.

In anderen Fällen bemerkt man Durchschlagstellen im oberen Teile der Stütze dicht unter dem Gewinde, trotzdem die äussere Oberfläche und das Innere der Stütze fast keinerlei Verkohlungen zeigen. Der verbrannte Teil muss dann der Punkt des höchsten Widerstandes der Stütze gewesen sein und der untere Teil ein so guter Leiter, dass er den kleinen Strom, welcher über die Oberfläche des Isolators verloren ging, ohne besondere Wärmewirkung in diesem Teile der Stütze durchfliessen liess. Die verminderte Isolation der Glocke war zweifellos durch Staub und Nebel hervorgerufen,

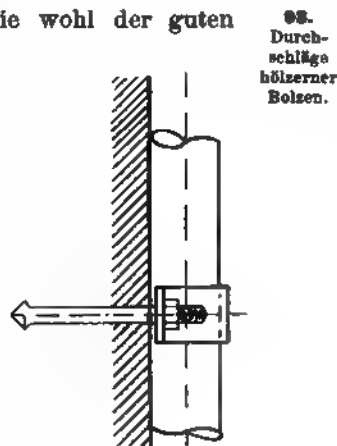


Fig. 159.

1) Electrical Review, 28. März 1903, S. 445—447.

während der obere Teil der Stütze, der durch den Isolator besser gegen Nebel und Schmutz geschützt war, infolgedessen einen höheren Oberflächenwiderstand hatte.

Zeigen sich saftige Teile im Holze der Stützen, so hat man bemerkt, dass diese weniger, oder überhaupt gar nicht vom Strom beeinflusst werden.

Eine andere Erscheinung an hölzernen Stützen bei Hochspannungsleitungen ist die, dass sich die Stützengewinde „auflösen“. Sie werden im Betriebe weich und können mit den Fingern weggerieben werden. Dieses weiche Holz hat einen sauren Geschmack und ähnelt breiig aufgelöstem Holze. Es sei bemerkt, dass diese Erscheinung nicht etwa von dem Durchbrennen irgend eines Teiles der Stütze begleitet zu sein braucht, vielmehr ist dies eine Folge der Vermorschung. Man ersieht hieraus, dass nur die Verwendung eiserner Stützen mit modernen der Spannung angepassten Isolatoren eine genügende Sicherheit bietet. In der That sieht man dies auch in Amerika mehr und mehr ein und lässt die hölzernen Stützen fallen. Hoffent-



Fig. 160.

lich machen wir uns diese Erfahrungen zu Nutze und beginnen nicht mit den gleichen zwecklosen Versuchen. An und für sich haben wir es auch gar nicht nötig, denn unser Isolatorenmaterial ist ganz vorzüglich.

94. Die Befestigung der Isolatoren auf den gebogenen Stützen muss derart erfolgen, dass eine durch die Befestigungsschraube gezogene Mittellinie den Isolator in der Mitte der Befestigungsstelle trifft (Fig. 160a); nur wenn dies der Fall ist, wird ein Drehmoment durch den vom Drahte ausgeübten Zug, wodurch der Isolator schräg gestellt werden würde, vermieden.

Befestigung
der Isola-
toren auf
den Stützen

Als Befestigungsmittel der Isolatoren auf den Stützen werden verwendet:

1. Bleiweiss oder Bleiglätte mit Glyzerin,
2. Gips,
3. geschmolzener Schwefel,
4. Hanf mit etwas Teer, Mennige oder Leinöl.

Das zuerst genannte Material bindet sicher und vermindert die Isolation nicht, ist jedoch wegen seiner Giftigkeit mit Vorsicht zu verarbeiten.

Gips ist nicht vorteilhaft zu verwenden, da er hygroskopisch ist und leicht zum Abbröckeln neigt. Um ein zu schnelles Erstarren des Gipses zu verhindern, kann der Brei mit zerriebener Malvenblüte verrührt werden. Im Winter gefriert öfter die im Gips enthaltene Feuchtigkeit und bewirkt ein Zerspringen des Isolators.

Schwefel wird heute weniger verwendet wie früher, da dieser häufig die Isolatoren auseinanderreibt. Die Ursache liegt in der Bildung von Schwefeleisen, welches sein Volumen vergrößert bei der Berührung des Schwefels mit der eisernen Stütze. Werden die Isolatorenstützen jedoch vor dem Einschweifeln mehrere Male mit Asphaltlack gestrichen, so dass der Schwefel mit dem Eisen nicht in Berührung kommt, so wird die Bildung von Schwefeleisen verhindert und die Isolatoren platzen nicht. Ein Zusatz von Cement zum Schwefel im Verhältnis von 1:4 leistet gute Dienste und bindet schnell. — Das unter der Bezeichnung Mettalcement in den Handel gebrachte Gemisch hat im wesentlichen diese Zusammensetzung.

Die Befestigung mittels Hanf wird bei der Telegraphen-Verwaltung ausschliesslich vorgenommen, während bei Starkstromleitungen diese Art nicht immer als sicher genug betrachtet wird, trotzdem eine eventuelle Auswechsellung derart befestigter Glocken bedeutend schneller von statten geht, als wenn dieselben aufgekittet werden. Die Isolatoren werden mit Hanf und Teer, oder mit Hanf und Mennige, aber auch mit Hanf und Wasser einfach aufgedreht.

Das Befestigungsmaterial soll nur die für die Aufnahme der Stütze bestimmte Höhlung des Isolators ausfüllen, da anderenfalls durch das hervorstehende Material der Isolationswert der Glocke wesentlich vermindert wird.

Die SIEMENS-SCHÜCKERT-Werke lassen die Isolatoren mit genauen Gewinden herstellen, der Bolzen wird in den Isolator eingesetzt und mit einer Metallmasse umgossen, worauf man imstande ist, den Isolator auf- und abzuschrauben.

Ferner werden von SCHÜCKERT auch Isolatoren zur lösbaren Befestigung mit einer schlitzförmigen Querdurchbohrung versehen, in welche ein Metallstück mit Gewinde eingeschoben wird (Fig. 160 b). In dieses wird die am oberen Teil mit Gewinde versehene Stütze eingeschraubt und so die Befestigung des Isolators auf der Unterlage ermöglicht.

Das Aufsetzen der Glocke auf die Stütze erfolgt vor der Befestigung der letzteren auf der Tragkonstruktion. Die Eisenstütze soll durch einen Anstrich von Leinölfirnis oder durch galvanische Verzinkung gegen Verrostung geschützt sein.

Das Leitungsmaterial für Freileitungen.

Für Spannungen bis 250 Volt ist es gestattet, isolierte Leitungen zu verwenden. Da es indessen eine Isolierung,¹⁾ welche allen Witterungseinflüssen widersteht, nicht giebt, so wird durch isolierte Leitungen nur für kurze Zeit der beabsichtigte Schutz erzielt. Die grössere Fläche der isolierten Leitungen bedingt eine grössere Schnee- und Windbelastung. Sie werden indessen dann verwendet,²⁾ wenn sie Schwachstromleitungen kreuzen, oder wenn die Freileitungen gegen unmittelbare Berührung geschützt werden sollen.

Als Hochspannungsleitungen, das sind also nach den vom 1. Januar 1904 gültigen Sicherheitsvorschriften alle Leitungen, deren Spannung gegen

95.
Lösbare Befestigungen.

96.
Isolierte Leitungen bis 250 Volt.

97.
Hochspannungsleitungen.

1) Näheres vgl. WEBER, Erläuterungen, 6. Aufl., S. 86, Anm. 3.

2) Vgl. Hackethaldrabt, Hdb. VI, 1, S. 158 und Hdb. VI, 2, Schutz gegen Telephon-

Erde 250 Volt überschreitet, müssen blanke Leitungen¹⁾ Verwendung finden. Es können jedoch Fälle eintreten, in denen eine Umhüllung des blanken Drahtes erwünscht ist, und zwar, wenn ätzende Dünste die Lebensdauer blanker Leitungen beeinträchtigen sollten. Für solche Fälle ist ein schützen-der Anstrich gestattet, der aber nicht als Isolierung aufzufassen ist. Es dürfte nun allerdings ungemein schwierig sein, einen allen Anforderungen genügenden Anstrich zu finden. Die sonst im allgemeinen für derartige Zwecke verwendeten säurefesten Emaillefarben sind für den vorliegenden Zweck wenig geeignet, da sie wegen der ständigen Bewegungen des Drahtes abbröckeln. Eher dürften hier die mit einem mit Mennige oder Bleiweiss unter Leinöl-zusatz getränkten Fasergespinnst umhüllten Leitungen in Frage kommen; sie müssen aber wie blanke Leitungen behandelt werden.

98.
Metall-
querschnitt
für Frei-
leitungen.

Der geringste zulässige Metallquerschnitt für Niederspannungsleitungen beträgt 6 mm² und für Hochspannungsleitungen 10 mm². Für die letzteren ist aber als Grundlage die Festigkeit²⁾ des hartgezogenen Kupferdrahtes gewählt worden, so dass der Mindestquerschnitt weicher Kupfersorten entsprechend grösser gewählt werden muss.³⁾ Dasselbe gilt auch für alle anderen Metalle, deren Zugfestigkeit geringer ist als die des hartgezogenen Kupfers. Für die Wahl der Minimalquerschnitte war nicht allein die unbedingt erforderliche Widerstandsfähigkeit gegen Atmosphärien, sondern auch eine gewisse Sichtbarkeit massgebend.⁴⁾

99.
Leitungen
aus Kupfer.

Mit verschwindend geringen Ausnahmen wird Elektrolytkupfer für Freileitungen verwendet; es kann aber auch, wenn besondere Festigkeitsrück-sichten es wünschenswert erscheinen lassen, Kupfer verwendet werden, welches den auf S. 11 des ersten Teiles dieses Bandes wiedergegebenen Normalien nicht entspricht. Insbesondere wird dies in solchen Gegenden der Fall sein, wo in der Regel mit grossen Schnee- und Eisbelastungen zu rechnen ist, oder wenn grosse Spannweiten zu überbrücken sind. Durch die Erhöhung der Festigkeit leidet allerdings auch die Leitfähigkeit des Materials. Jedoch ist eine höhere Strombelastung wie nach Tabelle No. 16 (Hdb. VI, 1, S. 24) für Freileitungen gestattet, da bei diesen die Gefahr einer Entzündung brennbarer Stoffe bei weitem nicht so gross ist, wie bei Leitungen in der Installation von Innenräumen. Ausserdem werden sie im Freien bei weitem besser gekühlt, so dass die an anderer Stelle erwähnte Temperaturzunahme bei Freileitungen nicht in gleichem Masse auftritt. Allerdings werden die Querschnitte von Freileitungen, insbesondere diejenigen, welche unter hohen Spannungen arbeiten, selten die zulässige Strombelastung zu tragen haben, da unter Berücksichtigung eines möglichst geringen Verlustes in den Lei-tungen die feuersicheren Querschnitte meistens weit unter dem Thatsächlichen der verlegten Leitungen liegen.

100.
Leitungen
aus
Aluminium.

Aluminium⁵⁾ hat bisher lange nicht die Verwendung gefunden, die man infolge seiner Leitfähigkeit und seines billigen Preises erwartet hatte. Es leidet zu sehr unter den alkalischen Verunreinigungen der Luft, obschon die sich bildende Oxydschicht den ferneren Oxydationsprozess etwas zu erschweren

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 10 u. ff. und 156.

2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 3.

3) Hierzu vgl. WEBER, Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften, 6. Aufl., S. 42, Anm. 8.

4) ETZ 1902, S. 698, Frage 9.

5) Näheres siehe Hdb. VI, 1, S. 14 u. ff.

diese zur Erde möglichst abgeschnitten wird. Bei den ersten oben erwähnten Typen war dieser Weg selbst für die geringen beim Telegraphieren auftretenden Ströme zu gering.

Solange ein Isolator in trockener Luft verwendet wird und die Spannung zwischen Draht und Stütze nicht allzu hohe Werte annimmt, genügt die Oberflächenisolation, um Nebenentladungen zu verhindern. Wird der Isolator dagegen feucht, wodurch natürlich die Oberflächenisolation wesentlich vermindert wird, wobei sich gleichzeitig aber auch die Leitungsfähigkeit der mit Wasserdämpfen erfüllten Atmosphäre erhöht, so treten Verluste auf, welche mit Randentladungen bezeichnet werden. Diese werden wesentlich dadurch unterstützt, dass Regentropfen nicht dem Gesetz der Schwere folgend vom unteren Rande des Mantels abtropfen, sondern in bestimmten Kurven der Stütze zustreben und so der höheren Spannung einen Weg zur Erde

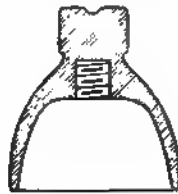


Fig. 161.

Fig. 162.

Fig. 163.

Fig. 164.

bieten. Zu diesen Entladungen liegt der Isolator im Nebenschluss und seine Isolierfähigkeit wird nahezu aufgehoben. Als Spannung der Randentladung wird nach FRIESE diejenige verstanden, bei der zwischen Draht und Stütze unter strömenden Regen die Spannung gerade überzuschlagen beginnt.

Um die Oberflächenisolation möglichst hoch zu bekommen, ist es erforderlich, dem Isolator eine solche Gestalt zu geben, dass die Oberflächenleitung möglichst gering wird, so dass dem Strom, welcher vom Draht zur Erde entweichen will, ein sehr grosser Stromweg entgegensteht. Infolgedessen sind aus dem einfachen Glockenisolator solche geworden, die statt eines einfachen Mantels deren mehrere besitzen, und es entstanden die in Fig. 165 wiedergegebenen Typen, die von SCHOMBURG & SÖHNNE, Berlin, hergestellt bei einer Höhe von 130 mm und einem äusseren Durchmesser von 110 mm für Spannungen bis 10000 Volt genügen. Indessen ist auch bei diesen wegen des geringen Abstandes der unteren Mantelränder die Verwendbarkeit für noch höhere Spannungen ausgeschlossen, da bei ihnen starke Randentladungen auftreten. Um dies zu vermeiden, wurden von der Porzellanfabrik Hermsdorf-Klosterlausnitz Isolatoren konstruiert (Fig. 166 a u. b),

immer. Die Masse und die Spannungen im Material werden zu gross und daher die Herstellung schwierig.

Man hat daher versucht, die Isolatoren aus mehreren Teilen herzustellen, von denen jeder für sich angefertigt und glasiert wird. Die einzelnen Teile werden dann zusammengekittet.

104.
Geteilte
Hoch-
spannungs-
isolatoren.

Fig. 169 a zeigt einen solchen Isolator, der bei der Gleichstrom-Hochspannungsübertragung Maurice-Lausanne bei einer Spannung von 22 000 Volt Gleichstrom Verwendung findet. Eine ähnliche Type ist auf der Strecke Paderno-Mailand im Gebrauch. Der innere einfache Mantel ist völlig glasiert, der äussere ist mit drei Glocken versehen. Die Befestigung des inneren Mantels auf den verzinkten Eisenstützen erfolgt ebenso wie die des äusseren Mantels auf dem inneren mit einem Gemisch von Glycerin und Bleiglätte. Die Anordnung der Leitungen auf dieser Strecke ist aus Fig. 169 b zu ersehen; die hier gezeichneten Fangbügel finden jedoch nur an Strassen und Wegübergängen Verwendung. Da bei Gleichstrom auf die Höhe des Selbstinduktionskoeffizienten keine Rücksicht genommen zu werden braucht, sind die Leiter ziemlich weit auseinander gelegt worden, und zwar in 80 cm Höhen- und 100 cm direkter Differenz.

Für die 55 km lange Strecke sind 1600 imprägnierte und in Cement eingesetzte Holzmaste verwendet, durchschnittlich kommt also auf je 35 m ein Mast.

105.
Glas-
isolatoren.

In Amerika werden sehr viele Glasisolatoren verwendet, gegen die jedoch eingewendet wurde, dass es nur schwer möglich sei, gut gekühlte Ware zu erhalten, die ausreichende Festigkeit besitzt. Demgegenüber betont WHITE,¹⁾ dass es überhaupt nicht möglich sei, Glasisolatoren zu durchschlagen und daher die Grenze ihrer Verwendbarkeit bei der Spannung liege, welche ausreiche, um den Isolator herum nach der Stütze überzuschlagen. Um hier dem Funken den Weg zu verlegen, werden die innersten Mäntel des Isolators tief über die Stütze heruntergezogen. Der Einwand, dass Glas hygroskopischer ist als Porzellan und dadurch ein schnelles Trocknen der Glocken nach Regen nicht möglich sei, ist übertrieben, ebenso wie der Vorschlag, in die Glocke eine vom Strom durchflossene Spule einzubauen, um den Isolator schneller zu trocknen. Dagegen ist durch die geringe Festigkeit des Glases bedingt, dass die Oberfläche nicht glatt bleibt, sondern rauh wird. Hierdurch ist die Ansammlung von Schmutz u. s. w. leichter möglich und eine geringere Oberflächenisolation die Folge. Auf die Unzulänglichkeit des Glases infolge seiner Empfindlichkeit gegen Temperaturschwankungen ist bereits auf S. 153 aufmerksam gemacht.

The Hemingray Glass Company in Covington, Ky., hat verschiedene Isolatorentypen aus Glas auf den Markt gebracht, von denen zwei Typen in Fig. 170 a u. b wiedergegeben sind. Die erstere, von der Missouri River Power Company verwendet, widersteht Spannungen bis 55 000 Volt und besteht aus zwei Teilen, die beide aus Glas sind. Der Isolator ist auf einem Schaft aus weisser Eiche befestigt und zeichnet sich dadurch aus, dass in eigenartiger Weise zwei Mäntel oberhalb der allgemein üblichen angeordnet sind. Bei anderen Typen der gleichen Firma ist der Rand der unteren

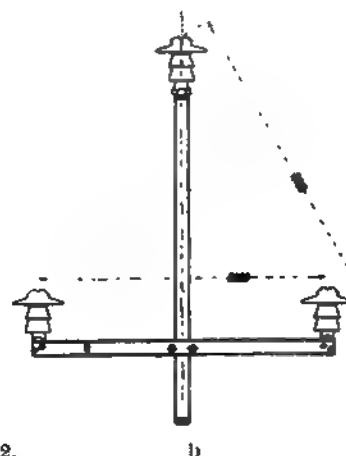
1) Conv. of the Nat. El. Light Ass. Niagara Falls, 1897, June. — HERZOG & FELDMANN, Beleuchtung, 1901, S. 153.

Witterung besser widersteht als Glas, dieses aber höheren Widerstand gegen Durchschlagen bietet.

Die Missouri River Power Co. besitzt in Kalifornien bei Black Canon am Missouri eine Wasserkraftanlage von etwa 10 000 PS, welche früher Zweiphasenstrom von 12 000 Volt und jetzt auch Drehstrom von 50 000 Volt liefert.

Nach der Zeitschrift „The Electrical Times“ besteht die 104 km lange Fernleitung nach Butte, mit 50 000 Volt Betriebsspannung, aus zwei völlig voneinander getrennten, auf zwei Reihen von 10 bis 30 m hohen Zedernmasten verlegten Leitungen. Die verwendeten Glasisolatoren (Fig. 172) von 150 mm Höhe und 230 mm Durchmesser wurden mit 100 000 Volt geprüft und sind auf paraffinierte Eichenholzstifte gesetzt. Einer der Isolatoren sitzt auf der Mastspitze, die beiden anderen auf einem Auslegerarm in solchem Abstand, dass die drei Leiter die Eckpunkte eines gleichseitigen Dreiecks von je 1·8 m Seitenhöhe bestimmen.

100. Ölisolatoren Anstatt den Stromübergang durch eine möglichst grosse Oberfläche zu vermindern, wurde vielfach versucht, eine Ölschicht derart anzubringen, dass



a

Fig. 172.

b

diese selbst einen Teil der isolierenden Oberfläche des Isolators bildet. Bereits im Jahre 1869 nahmen LENOIR & PRUDHOMME¹⁾ ein Patent auf die Verwendung von Öl für diese Zwecke, JOHNSON & PHILLIPS verwendeten sie jedoch erst 1876 in mehreren Ausführungsformen. Indessen zeigen diese Ölisolatoren mannigfache Mängel, die ihre Einbürgerung verhinderten. Leichte Ölsorten wurden, da sich Wasser in den für das Öl bestimmten Hohlräumen ansammelte, von diesem herausgedrängt, andere Öle verharzten, die grossen Hohlräume gaben den Insekten gute Schlupfwinkel. Da der Isolator naturgemäß nur dann eine volle Isolierfähigkeit besitzt, wenn sich die Ölschicht in Ordnung befand, so mussten die Isolatoren häufig nachgesehen werden, wodurch sich ihr Verwendungsgebiet auch nicht erweitern konnte. Ausserdem geriet beim Durchschlagen eines derartigen Isolators das Öl mitunter in Brand, der dann auf die Masten übergriff.

1) HERZOG & FELDMANN, Elektrische Beleuchtung, 1901, S. 150.

Nach einer Anordnung der SIEMENS-SCHUCKERT-Werke wird um die Krücke eine Schelle gelegt, an der dann Apparate oder Leitungsschienen befestigt werden können (Fig. 179 b).

Als Spezialtype für die Befestigung von den beweglichen Leitungen,

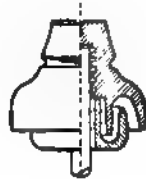


Fig. 176.



Fig. 178.

Fig. 177.

welche Bogenlampen den Strom zuführen, sei Fig. 180 gezeigt. Auf dem Isolatorkopf ist ein Gussstück festgekittet, welches eine trompetenförmige Öffnung hat. Diese hat den Zweck, dass das hängende Seil sich bewegen kann, ohne sich zu scheuern.

Fig. 179.

Fig. 180.

Das zur Herstellung von Isolatoren verwendete Porzellan und seine Fabrikation.

160. **Allgemeines über die Porzellan-isolatoren.** Ein wesentlicher Faktor für die Güte der Porzellanisolatoren ist die Zusammensetzung des Materials und seine technische Behandlung, damit es die ausserordentlich grosse Hitze beim Brennen so verträgt, dass Formveränderungen, welche nachteilig wirken, nicht auftreten können und vor allen Dingen Risse vermieden werden.

Ferner eignet sich auch nicht jede Porzellanmasse zur Verarbeitung für Isolatoren. So ist z. B. Amerika arm an Kaolin und die aus amerikanischem

Porzellan-Probestück, $100 \times 100 \times 10$ mm, eingebettet in Portlandcement, durchschlagen bei 17 000 Volt,

Porzellan-Probestück, $100 \times 100 \times 10$ mm, nicht in Cement eingebettet, durchschlagen bei 20 250 Volt,

Fensterglasscheibe, $150 \times 150 \times 3.2$ mm, durchschlagen bei 40 000 Volt,

Glasierte Porzellanplatte, 150 mm \varnothing , 3.2 mm stark, durchschlagen bei 49 500 Volt.

Eine Glasplatte, $150 \times 150 \times 6.3$ mm, widerstand einer Spannung von 60 000 Volt, dann sprang der Lichtbogen um die Platte herum, ohne diese zu durchschlagen.

Aus diesen Resultaten ist festgestellt, dass

1. Portlandcement keinen grösseren Isolationswiderstand hat als eine gleich starke Schicht trockener Luft,
2. Porzellan, wenn es nicht vollkommen verglast ist, kein besonders hohes Isolationsvermögen hat, selbst wenn es vollkommen trocken ist,
3. bei Fensterglas das Isolationsvermögen zwischen demjenigen von halb verglastem und verglastem Porzellan liegt,
4. vollständig verglastes Porzellan, selbst wenn es nur 3.2 mm stark ist, einen so hohen Isolationswiderstand zeigt, wie dieser unter heutigen Verhältnissen erforderlich wird,
5. eine Glasplatte ein besonders hohes Isolationsvermögen besitzt.

Da von einem guten und einwandsfrei hergestellten Isolator der Erfolg einer Fernübertragung nicht zum geringsten Teil abhängt, seine Güte aber wieder durch die Herstellung und Behandlung des Porzellans bedingt ist, seien einige Worte über dieselbe gesagt, wobei wir uns an eine Arbeit von HERZOG und FELDMANN halten.¹⁾

110.
Eigen-
schaften des
Porzellans.

Das Hartfeuer-Isolierporzellan unterscheidet sich wesentlich von dem sogenannten Geschirrporzellan; letzteres ist zu transparent und hat daher keine genügende Isolierfähigkeit. Das Porzellan besteht aus einem im Feuer unschmelzbaren, weissen Thon, der Porzellanerde (Kaolin), wodurch die Formbarkeit möglich ist, und aus zwei im Feuer schmelzbaren Substanzen, dem Quarz und dem Feldspat. Werden diese drei Substanzen in feingemahlenem Zustande einer Hitze, bei welcher Gold schmilzt, ausgesetzt, kommen die Quarz- und Feldspatteilchen innig zusammen. Dabei sind sämtliche ursprünglich vorhandenen Poren ausgefüllt und man erhält ein hartes, klingendes Produkt. Je feuerfester das Kaolin und je grösser der Feldspatgehalt ist, je feiner die Mahlung des Rohmaterials und endlich, je höher die Brenntemperatur ist, desto isolierfähiger ist die Porzellanmasse. Die Glasur ist Kali-Kalk-Thonerde und Glas und besteht gleichfalls aus Kaolin, Quarz,

1) ETZ 1900, S. 905; ferner die Fabrikation des Feldspat-Porzellans von GRIMM (HARTLEBENS chemisch-technische Bibliothek, Bd. 249); KERL, Handbuch der Thonwarenindustrie, Braunschweig; JAENNICKÉ, Geschichte der Keramik. — Soeben ist ein vom Prof. FRIESE im Auftrag der Porzellanfabrik Hermsdorf-Klosterlausnitz herausgegebene Buch „Das Porzellan als Isolier- und Konstruktionsmaterial in der Elektrotechnik“ erschienen, welches sehr empfehlenswert ist; es konnte leider für die vorliegende Arbeit nicht mehr benutzt werden, mit Ausnahme der Lieferungsbedingungen auf S. 170.

(Alkali), welcher in bezug auf Zugfestigkeit befriedigende Resultate ergab, schwankte zwischen

$$\begin{array}{l} 40\% \text{ K}_2\text{O} \text{ und } 80\% \text{ K}_2\text{O}, \\ 60\% \text{ CaO} \quad \text{„} \quad 20\% \text{ CaO}. \end{array}$$

Im übrigen ist die Festigkeit des Porzellans sehr gross; es widersteht einem

$$\begin{array}{l} \text{Druck von ca. } 4500 \text{ kg/cm}^2, \\ \text{Zug} \quad \quad \quad \text{„} \quad \quad \quad 1700 \text{ kg/cm}^2. \end{array}$$

Das Kaolin hat die Eigenschaft, beim Trocknen und Brennen sein Volumen und Gewicht zu verringern, man muss also bei der Fabrikation mit einer gewissen Schwindung rechnen, die dadurch festgestellt wird, dass man aus der Masse verschiedene Gegenstände formt, diese brennt und erst dann die Dimensionen genau berechnet, um den Schwindungsgrad festzusetzen. Eine gewisse Abweichung ist daher auch von den Interessenten immer zugelassen. Die meisten Telegraphenbehörden lassen z.B. bei Isolatoren eine Abweichung von 3–5% von den vorgeschriebenen Dimensionen zu.

Bezüglich der Schwindung sei noch erwähnt, dass drei Faktoren dieselbe beeinflussen: 1. Die Menge der verwendeten Thonmasse; 2. die Verschiedenheit in bezug auf die Art des benutzten Flussmittels; 3. der Gehalt an Kiesel-erde. Den Grad des Schwindens kann man daher fast jedem besonderen Falle anpassen.

Jedoch ist die Schwindung nicht ganz sicher anzugeben, ist auch von der Bearbeitungsmethode abhängig. Sie beträgt ungefähr 14–18%.

Ein ideales Porzellan für elektrische Zwecke kann enthalten: 50–80% seines Gehaltes an RO (Alkali) in Form von K_2O und den Rest als CaO, ferner 0.8 bis 1.0 Al_2O_3 und 4.2 bis 6.2 SiO_2 . Als Formel zusammengefasst erhält man als Grenze der Zusammensetzung:

$$\left. \begin{array}{l} 0.5 \text{ bis } 0.8 \text{ K}_2\text{O} \\ 0.5 \quad \quad 0.2 \text{ CaO} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0.8 \text{ bis } 1.0 \text{ Al}_2\text{O}_3 \\ 4.2 \text{ bis } 6.2 \text{ SiO}_2 \end{array}$$

Engere Grenzen müsste man noch ziehen, wenn man bezüglich des Produktes besondere Anforderungen stellt, welche sich z. B. auf spezielle Härte oder grössere Durchsichtigkeit erstrecken. Indessen würde jedes beliebige, innerhalb der aufgestellten Grenzen angefertigte Porzellan unter sonst gleichen Verhältnissen demjenigen Porzellan mindestens gleichwertig, wenn nicht gar überlegen sein, welches bei dem jetzt im Handel erhältlichen elektrischen Isolator Verwendung findet.

111. Auf die Zusammensetzung der Glasur muss auch besondere Sorgfalt verwendet werden. Dieselbe muss vor allem hart, weiss und von solcher Zusammensetzung sein, dass sie allen Witterungseinflüssen widersteht. Die Glasur muss einen solchen Schmelzpunkt haben, dass sie zur selben Zeit vollkommen schmilzt, wo die Masse erweicht und daher eine innige Verkittung ihrer Bestandteile herbeigeführt wird. Ist sie zu schwerflüssig, dann ist die Masse zu früh gargebrannt, ist sie zu leichtflüssig, dann rinnt sie wiederum zu schnell ab. Die Glasur muss aber auch den gleichen Ausdehnungskoeffizienten haben wie die Porzellanmasse, da sonst bei Erwärmung und Abkühlung infolge ungleicher Spannungsverhältnisse Risse entstehen. Man bereitet die Glasuren meist aus Quarz, Feldspat, Kaolin und Kalk, doch werden auch gemahlene Porzellanscherben, Dolomit u. s. w. verwendet. Farbige Glasuren enthalten Zusätze färbender Oxyde, als Kobalt (blau), Chrom (grün), Eisenoxýd (braun),

und es bleibt nur ein feines, weisses Pulver an der Oberfläche der Masse. Sollen kleinere Flächen unglasiert bleiben, so werden diese vorher mit Öl bestrichen oder durch Kautschukschablonen gedeckt.

Nach dem Glasieren werden die Körper wieder in Kapseln gebracht und im sogenannten Glattofen wiederum gebrannt. Die Temperaturen der einzelnen Öfen sind verschieden, denn es herrschen im unteren (Scharfffeuer-) Ofen circa 1800 bis 2000° C., in dem obersten 600 bis 800° C. Zur Bedienung des Ofens und überhaupt zur Erzielung guter Resultate bedarf es eines mit der Leitung des Brandes und Ofens innig vertrauten Personals; nur dann kann man das von so vielen Zufälligkeiten abhängige gute und gleichmässige Porzellan erlangen.

Bei einem Ofen von 6 m Durchmesser und 3 m Höhe stellen sich die Arbeitszeiten ungefähr wie folgt:

Füllen des Ofens	20 Stunden
Vorfeuer	8 „
Scharfffeuer	14 „
Abkühlen des Ofens	38 „
Entleeren des Ofens	10 „

wozu im ganzen für die drei Etagen des Ofens ein Personal von circa 40 Personen erforderlich ist. Der Kohlenverbrauch ist zwei Waggon Braunkohle und ein Waggon Steinkohle.

Ist nun der Brand so weit gediehen, dass der Brenner die Beendigung des Brandes für angezeigt hält, so wird „eine Probe gezogen“. Es werden mittels Haken aus dem Innern die zu diesem Zweck eingestellten Porzellanbecher entnommen, an deren Aussehen der Fortschritt des Brandes zu erkennen ist. Zeigt der Probebecher, dass Masse und Glasur ausgebrannt sind, so ist der Brand als beendet anzusehen. Mit dem Schüren wird aufgehört, die Heiztüren werden gut verschlossen und verschmiert und der Ofen sich selbst überlassen. Nach circa 24 bis 36 Stunden ist er genügend abgekühlt, worauf die Kapseln herausgenommen und entleert werden können. Die Waren kommen dann in einen Sortierraum, in dem die unbrauchbaren Stücke herausgesucht werden.

Untersuchung der Isolatoren.

112.
Prüfung der
Isolatoren
auf ihre
mechanischen
Eigenschaften.

Die Widerstandsfähigkeit des Isolators gegen Entladungen, welche quer durch das Material gehen und in der Regel vom Draht nach der Stütze erfolgen, wird um so grösser sein, je besser das Porzellan behandelt worden ist; nur in höchster Temperatur gebranntes Porzellan ist imstande, genügende Durchschlagsfestigkeit zu gewährleisten. Als Erkennungsmittel für die Güte des Porzellans giebt die Porzellanfabrik Hermsdorf an, dass die Bruchfläche des Porzellans ein fettglänzendes weisses Aussehen haben muss und dass ein auf die Bruchfläche gebrachter Tropfen Tinte nicht aufgesogen werden darf. Er muss vielmehr, ohne irgend welche Spuren zu hinterlassen, wieder abgewischt werden können.

Das beste Porzellan zeigt einen glatten Bruch wie Glas. Wenn in dieser Beziehung irgend welche Zweifel über die Qualität des Porzellans vorliegen, muss es in kleine Stücke zerbrochen, einige Zeit in einem trocknen, warmen

eingesetzt werden. Der Bottich wird nach dem Einsetzen der Isolatoren bis zu einer bestimmten Marke mit Wasser gefüllt und hierauf auch in die Gewindelöcher der Glocken soviel Wasser eingelassen, dass dessen Oberfläche mit dem im Bottich befindlichen in gleicher Höhe steht. Hierauf wird ein Messingkettchen in jeden Isolator eingehängt und dann der Hochspannungstromkreis geschlossen. Ist ein Isolator defekt, so schlägt hier die Spannung über, es entsteht Kurzschluss und der vorerwähnte Automat schaltet die Leitung aus.

In Station I befindet sich über dem Bottich auch noch ein Regenapparat, aus welchem ein feiner Regen auf die in diesem Fall über dem Bottich in senkrechter Stellung angebrachten Isolatoren herabrieselt. Bei dieser Prüfung wird um den Kopf des Isolators der eine Pol der Hochspannung gelegt, während der andere mit den Stützen verbunden ist. Die Prüfung erfolgt also unter durchaus praktischen Verhältnissen.

Bezüglich der Höhe der Prüfspannung gehen die Porzellanfabriken meistens über die durch die Verbandsnormalien verlangten Prüfspannungen¹⁾ wesentlich hinaus, und zwar spannt die Porzellanfabrik Klosterlausnitz ihre Deltaglocken mit den aus der folgenden Tabelle ersichtlichen Prüfspannungen.

	Betriebsspannung	Prüfspannung
Glocken bis	5 000 Volt	20 000 Volt
„ „	10 000 „	30 000 „
„ „	20 000 „	50 000 „
„ „	50 000 „	100 000 „

Hierbei muss aber noch berücksichtigt werden, dass bei diesen Prüfungen zwischen Draht und Stütze die Spannung herrscht, während sie im Betriebe zwischen zwei Drähten, also auf dem Wege über zwei Isolatoren auftritt. Hierdurch wird die Sicherheit noch wesentlich erhöht.

Im Zusammenhange mit den elektrischen Prüfungen ist es gut, die Muster auch auf mechanische Festigkeit zu untersuchen, wenn der Isolator einer Type angehört, die dies erforderlich macht.

Diese Prüfungen sind besonders wünschenswert bei zusammengesetzten Isolatoren, um sicher zu gehen, dass die einzelnen Teile sich nicht trennen. Solche Isolatoren müssen in Richtung der Bolzenachse geprüft werden, da bei Überlandleitungen, welche durch Bodensenkungen führen, ein nach oben gerichteter Zug nicht selten auf sie ausgeübt wird.

Interesse haben auch für den Starkstromtechniker die von der Reichstelegraphenverwaltung aufgestellten Lieferungsvorschriften, die hierunter wiedergegeben sind:²⁾

Die Porzellandoppelglocken müssen nach Form und Abmessungen den vereinbarten Zeichnungen entsprechen. Von den darin angegebenen Masse sind folgende Abweichungen gestattet:

- eine Abweichung von 5⁰/₀ mehr oder weniger für die Stärke des Kopfes;
- eine Abweichung von 5⁰/₀ mehr oder weniger für die Höhe der Doppelglocke;

1) Doppelte Betriebsspannung.

2) Nach einer Zusammenstellung von OSKAR OTTO (in FRIESE, Porzellan).

durch brauchbare Stücke ersetzt, so wird für den Lieferer eine Konventionalstrafe ausbedungen, ohne dass er dadurch von der Erfüllung des Vertrages entbunden wird. Gewöhnlich gilt diese Strafe nach Ablauf der vereinbarten Lieferfrist als verfallen, ohne dass es der gerichtlichen oder aussergerichtlichen Mahnung bedarf. Auch wird der Unternehmer durch die Annahme der verspätet gelieferten Doppelglocken von der Zahlung der Strafe nicht befreit.

Hat der Lieferer nach Ablauf der ausbedungenen Fristen seinen Verpflichtungen nicht völlig genügt, so ist der Bezieher berechtigt, die fehlenden Stücke auf Kosten des Unternehmers, wo und zu welchem Preise er sie überhaupt am schnellsten erhalten kann, zu beschaffen und versenden zu lassen. Werden auf diese Weise beschaffte Doppelglocken zu billigeren als den ausbedungenen Preisen anderweit gekauft, so hat der Lieferer auf Vergütung des Preisunterschiedes keinen Anspruch.

Wenn der Lieferer nachweist, dass die Verzögerung der Lieferung durch höhere Gewalt oder durch Arbeitseinstellung der Arbeitnehmer verursacht ist, so wird weder eine Konventionalstrafe erhoben, noch treten die Bedingungen bezüglich anderweiter Beschaffung der Lieferung auf Kosten des Lieferers in Kraft. Dagegen hat der Bezieher, sobald eine der vertragsmässig festgesetzten Lieferfristen abgelaufen ist, ohne dass der Lieferer seine Verpflichtungen völlig erfüllt hat, das Recht, den Vertrag gänzlich aufzuheben, ohne dass dem Lieferer ein Schadenersatzanspruch irgend welcher Art zusteht.

Bei grösseren Lieferungen wird häufig die Stellung von Bürgen oder Kautionen nach den allgemein geltenden Bestimmungen gefordert.

Vorstehende Lieferungsvorschriften bieten ganz oder teilweise einen Anhalt für den Abschluss von Verträgen bei grösseren Lieferungen. Für den Lieferer selbst gelten die allgemein gültigen kaufmännischen Bräuche und die Bestimmungen des Bürgerlichen Gesetzbuches.

Die Befestigung der Leitungen auf dem Isolator.

116.
Bindungen.

Um eine betriebssichere Fernleitung zu erhalten, müssen die Leitungen auf den Isolatoren so befestigt werden, dass sie durch die ständigen Bewegungen des Drahtes nicht gelöst werden können. Indessen darf auch durch keine Befestigungsart der Leiter beschädigt und somit in seinem Querschnitt vermindert werden.

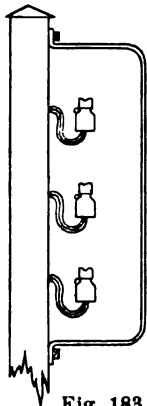


Fig. 183.

Die Drähte werden entweder auf dem Kopfe des Isolators oder an seiner seitlichen Rille festgebunden. Um die Leitungen an jedem Isolator in beiden Arten anbinden zu können, ist derselbe meistens mit einer Einkerbung des Kopfes und mit einer rund um ihn herumlaufenden Rille versehen.

Während im allgemeinen auf der geraden Strecke die erste Anordnung gern gewählt wird, muss in Kurven und Winkelpunkten die zweite Anwendung finden. Dabei muss aber der Draht auf die der Zugrichtung entgegengesetzte Seite des Isolators gelegt werden, damit der Zug vom Isolator und nicht vom Bindendraht aufgenommen wird. Ferner besteht durch diese Anbringung insofern eine grosse Sicherheit, als beim

Bruch eines Isolators der Draht nicht abgeschleudert wird und zur Erde fällt, sondern von der Stütze aufgefangen wird. Ausserdem sind an diesen Stellen besondere Fangbügel anzubringen, die, wie Fig. 183 zeigt, einseitig oder in anderen Fällen auch wohl auf beiden Seiten der Maste angeordnet sind (Fig. 169 b).

Als Bindematerial wird meistens weicher Kupferdraht in Stärken von 1·5 bis 2·5 mm verwendet, nur wenn Eisenleitungen verlegt werden, findet, um die Bildung eines Elementes zu vermeiden, das gleiche Material zum Abbinden Verwendung. Hauptsache ist, insbesondere bei Hochspannung, dass

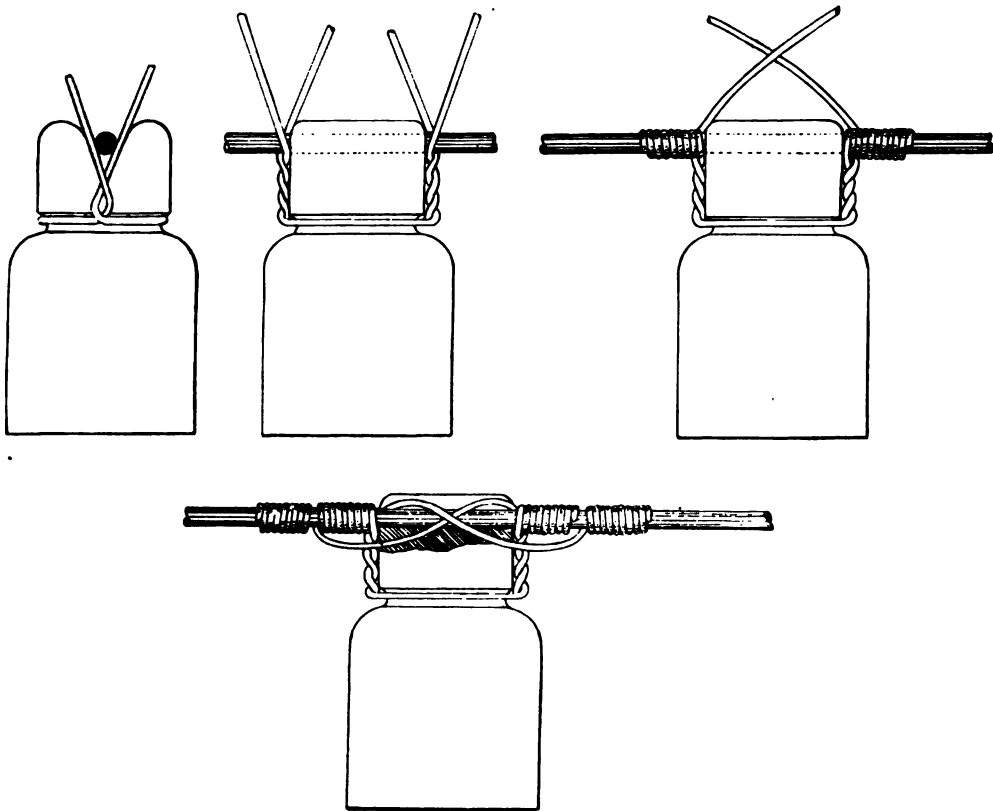


Fig. 184.

durch den Drahtbund die Leitung am Isolatorenkopf unverrückbar fest gelegt wird und dass der Bindendraht nicht in das Leitungsmaterial einschneidet.¹⁾ Es wird daher auch meistens dem weichgezogenen Kupferdraht als Befestigungsmittel der Vorzug gegeben.

Erfolgt die Befestigung des Drahtes auf dem Kopfe, so wird der sogenannte Oberbund angewendet. Es werden zwei Bindedrähte um den Hals des Isolators gelegt und miteinander verschlungen; hierbei werden die Drahtenden aber ungleich lang gelassen, und zwar so, dass sich auf jeder Seite des Isolators je ein langes und ein kurzes Ende befindet. Der zu befestigende

1) § 23 g der Hochspannungsvorschriften.

Draht wird in die so entstandene Drahtgabel gelegt und dann das kurze Ende des Bindedrahtes fest umgelegt; die längeren Enden werden dann kreuzweise um den Isolatorkopf gelegt und hinter dem festgewickelten anderen Ende ebenfalls um den Leiter gewickelt. Den Gang der Bindung zeigt Fig. 184.

Bei der seitlichen Befestigung des Drahtes ist nur ein Bindedraht erforderlich, der zunächst um den Hals des Isolators, dann um den Leiter und zurück um den Isolator geschlungen wird. Hierauf werden die beiden Drahtenden gut miteinander verwürgt oder um den Arbeitsdraht geschlungen (Fig. 185).

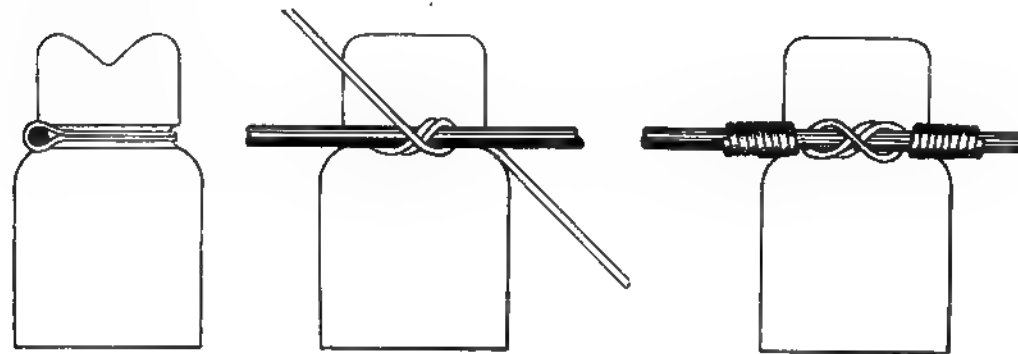


Fig. 185.



a

Fig. 186.

b

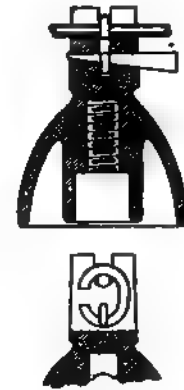


Fig. 187.

An solchen Stellen, wo ein besonders grosser Leitungszug auftritt, werden oft statt eines Bundes deren zwei angebracht.

Für eine sehr sichere Befestigung der Leitung am Isolator stellen SCHOMBURG & SÖHNE A.-G., Berlin, einen sogenannten Sturmisolator her, dessen Kopf mit einer schraubenförmigen zweiten Rille versehen ist (Fig. 186 a). Diese Rille dient zur Herstellung einer zweiten Befestigung, die, nachdem der erste Bund in der üblichen Weise hergestellt ist, in der in Fig. 186 b wiedergegebenen Art, die einer besonderen Erläuterung nicht bedarf, hergestellt wird.

Dieser Bund soll überall da Verwendung finden, wo grosse Spannweiten überwunden werden müssen oder wo die Leitungen in oft eingeschnittenem, wechselnden Gelände geführt werden.

Indessen treten hierbei häufig grosse Schwierigkeiten dadurch auf, dass die Besitzer der Grundstücke, sofern sie nicht selbst ein Interesse an der Anlage haben, das Setzen von Masten und das Spannen der Leitungen nicht zulassen und rechtlich auch kaum dazu gezwungen werden können.

119.
Rechtliche
Verhält-
nisse.
Enteignung
bei Fern-
leitungen.

Die Elektrotechnik¹⁾ genießt, trotzdem sie eine so ungeheure Rolle spielt, rechtlich durchaus nicht den Schutz, der ihr als Kulturmittel ersten Ranges wohl zukommen müsste. Es ist dies wohl darauf zurückzuführen, dass die Anschauungen im Rechtsverhältnis und der Gesetzgebung nicht gleichen Schritt mit den Lebensverhältnissen in der Elektrotechnik halten und auch kaum halten konnten. Hierher gehören in erster Linie die grossen Schwierigkeiten, welche entstehen, wenn fremder Grund und Boden in Anspruch genommen werden soll, da eine Enteignung unter den bestehenden Verhältnissen kaum möglich ist. Dass im übrigen das Deutsche Reich bisher auf ein allgemeines Elektrizitätsgesetz verzichtete, ist nur anerkennenswert, da dasselbe jedenfalls nicht günstig auf die Entwicklung der Elektrotechnik eingewirkt und sie in ihrer Entwicklung gehemmt hätte.

Das Gesetz vom preussischen Landrecht vom 11. Juni 1874 besagt über das Enteignungsverfahren in § 1:

„Das Grundeigentum kann aus Gründen des öffentlichen Wohles für ein Unternehmen, dessen Ausführung die Ausübung des Enteignungsverfahrens erfordert, gegen vollständige Entschädigung entzogen oder beschränkt werden.“

Es steht also von seiten des preussischen Rechtes (das der Bundesstaaten ist hierin nicht viel anders) der Enteignung nichts im Wege, wenn das Werk nur als dem öffentlichen Wohle dienend angesehen wird. Den Klein- und Nebenbahnen wird auch, wenn sie im Privatbesitze sind, das Enteignungsrecht regelmässig zugebilligt, doch wird nicht anerkannt, dass Elektrizitätswerke auch dem öffentlichen Wohle dienen.

Folgendes Beispiel möge die Sachlage in nähere Beleuchtung bringen.

Ein Braunkohlenwerk, dessen Kohle so minderwertig ist, dass sich ein Transport per Achse von der Grube bis zur nächsten 30 km entfernten Industriestadt nicht einrichten lässt, will diesem Übelstande abhelfen. Man denkt entweder eine Bahn zur Stadt zu bauen, oder man will auch die Kohle an der Grube selbst verbrennen, damit Elektrizität erzeugen und diese nach dem Industriezentrum leiten. Dadurch würde man den kleinen Konsumenten an Stelle der Kohle gleich Kraft in fertiger Form abgeben können und die Konsumenten würden sich dabei unbedingt besser stellen. Ausserdem würden die Einwohner noch elektrisches Licht brennen und die Kraft für chemische Zwecke und Heizung nutzbar machen können.

Es liegt klar auf der Hand, dass das Enteignungsrecht der Bahn ohne jeden Widerspruch, dagegen dem Elektrizitätswerk wohl nur mit vieler Mühe oder gar nicht erteilt werden würde, obwohl die Art des Transportes der Energie in letzterem Falle weiteren Volksschichten zugute käme.

1) ETZ 1898, Heft 27, S. 435; 1899, Heft 5, S. 91; 1904, S. 566. WENGLER, Elektrizität und Recht, Leipzig 1900. MEILI, Die elektrischen Stark- und Schwachstromanlagen und die Gesetzgebung, Zürich 1899. PFLEGHART, Die Elektrizität als Rechtsobjekt, Strassburg 1901.

Nun kommen noch die unendlichen Mühen hinzu, welche man zur Erreichung des Zweckes mit den Leuten hat, die einesteils von dem Projekte gar nichts wissen wollen, andererseits diesem gar feindselig gegenüberstehen. Nehmen wir nun aber an, die Gestänge seien gesetzt und das Leitungsziehen beginnt . . . Es werden jetzt neue Konflikte mit den Grundeigentümern entstehen, bei denen Ecken oder Teile von Grundstücken mit Drähten überspannt werden müssen, da der Luftraum über dem Grundstück auch dem Eigentümer des letzteren gehört.

Diesem Verhältnis ist aber im neuen Bürgerlichen Gesetzbuch durch § 905 schon teilweise Rechnung getragen, in dem es heisst:

„Der Eigentümer (eines Grundstückes) kann jedoch Einwirkungen nicht verbieten, die in solcher Höhe oder Tiefe vorgenommen werden, dass er an der Ausschliessung kein Interesse hat.“

Inwieweit dies aber dem Elektrizitätswerk zugute kommt, wird in vielen Fällen noch durch richterliche Entscheidung erwiesen werden müssen,¹⁾ zumal, wie aus den Erläuterungen zum B. G.-B., Ausgabe von Achilles, hervorgeht, nicht vom Eigentümer, sondern vom Gegner der Beweis geführt werden muss, dass der erstere kein Interesse an der Inanspruchnahme des Luftraumes oder des Erdinnern seines Grundstückes haben kann.

Ein weiterer Missstand ist noch darin zu suchen, dass in den mit den einzelnen Grundbesitzern aufzustellenden Verträgen Kündigungsrechte vorbehalten bleiben, wodurch auch noch der sichere Betrieb eines Werkes in Frage gestellt ist, denn diese Kündigungsfrist wird von den Besitzern möglichst kurz gestellt und es ist dann von dessen Laune abhängig gemacht, ob sie in eine Verlängerung des Vertrages willigen.

Enteignungsrechte kämen ausser den vorerwähnten noch in Frage, wenn sich eine Erweiterung des Elektrizitätswerkes erforderlich macht und die benachbarten Baugrundstücke nicht zu erhalten sind. Für den Neubau eines mit Dampf, Gas, Petroleum getriebenen Elektrizitätswerkes dagegen kann billigerweise das Enteignungsrecht nicht verlangt werden, da dieses nicht an eine bestimmte Stelle gebunden ist; anders liegen die Dinge bei der Ausnützung von Wasserkraften.

MEILI²⁾ verlangt für die folgenden Fälle das Enteignungsrecht:

- I. für die elektrische Anlage und Zubehörteile und Mittel, nämlich
 - a) für das Ziehen von Drähten und Setzen von Stangen,
 - b) für die Anbringung von Stützpunkten an Gebäuden,
 - c) für das Aufstellen von Überführungs- und Kabeltürmen (je mit Zugangsrecht zu denselben);
- II. für die Einrichtungen zur Fortleitung und Verteilung der elektrischen Kraft (nicht aber für die Einrichtungen zur Erzeugung der elektrischen Kraft);
- III. für die Anlage von Transformatorenstationen mit ihren Zubehören in unmittelbarer Nähe und bei durchlaufendem Betrieb für Wärterhäuser.

1) Vgl. ETZ 1898, S. 329; 1899, S. 160, Reichsgerichtsentscheidung, betr. das Wege-recht; 1904, S. 367, 567. EA 1905, S. 128.

2) MEILI, S. 26.

Benutzung von Strassen bieten zur Anlage der Kapitalien einen zu geringen Schutz; dem Verlangen nach sichereren Verhältnissen könnte eine Gegenleistung des Unternehmers immerhin gegenübergestellt werden. Diese würde in der Verpflichtung zur Einhaltung eines Maximaltarifes bei Abgabe elektrischer Energie bestehen können.

Recht und billig wäre es, das Enteignungsrecht allseits gelten zu lassen, da Elektrizitätswerke, welche grössere Bezirke mit Energie versorgen, ebenso als dem öffentlichen Wohle dienend betrachtet werden müssen, wie z. B. eine Bahn, die in vielen Fällen sogar von privater Seite gebaut wird.

121.
Freileitungen
innerhalb
von Ortschaften
und Grundstücken.

Freileitungen innerhalb der Ortschaften und Grundstücke sind hauptsächlich mit Rücksicht darauf anzuordnen, dass sie von Gebäuden aus nicht erreichbar sind; wo die Entfernung nicht gross genug gewählt werden kann, muss durch die Anordnung von Schutzverkleidungen, Schutznetzen oder dergleichen eine ausreichende Sicherheit geschaffen werden, um so mehr, als in Ortschaften die Eisenkonstruktionen unmittelbar an oder auf den Häusern angebracht werden. Bei Hochspannung wird man dagegen in vielen Fällen vorziehen, von dieser Anordnung ganz abzusehen und für die Leitungen ebenso wie im freien Gelände besondere Leitungsmaste aufzustellen. Erschwerend wirken in vielen Fällen behördliche Vorschriften, die aus ästhetischen Gründen erlassen werden, oder auch in Massnahmen der Feuerwehren ihren Grund finden. So dürfen z. B. in Berlin die Höfe der Grundstücke von Freileitungen nicht überspannt werden. Die Leitungen müssen an den Gebäuden entlang laufen, dürfen aber auch hier nicht weiter als 30 cm über die Mauerfläche vortreten. Dafür ist aber isolierte Leitung vorgeschrieben, die dieselbe Isolierung aufweisen muss, wie die im Innern verlegten Leitungen. Welchen Wert die Isolierung im Freien hat, haben wir an anderer Stelle bereits gesehen. Freileitungen in Ortschaften müssen während des Betriebes streckenweise ausschaltbar sein.

Kreuzungen von Freileitungen mit Strassen und Bahnkörpern.

122.
Kreuzungen
mit Hilfe
hoher Maste.

Hochspannungsleitungen werden trotz der hierbei auftretenden Schwierigkeiten gern abseits der Verkehrsstrassen geführt; wo man jedoch Ortschaften, Strassen oder Eisenbahnen kreuzen muss oder sich ihnen nähert, sind besondere Vorsichtsmassregeln zu treffen, um die Passanten oder Eisenbahnen vor fallenden Masten oder Drähten zu schützen.

Richtige Berechnung und Dimensionierung der Freileitungen, sowie der Masten und Gestänge bieten den grössten Schutz gegen Drahtbrüche. Bei grossen Spannweiten pflegt man Stahlselle zu spannen und an diesen die Starkstromleitungen isoliert zu befestigen. Da indessen die Überspannungen verhältnismässig grossen Gefahren ausgesetzt sind, so genügen sie nicht immer, und insbesondere an solchen Orten werden weitere Vorsichtsmassregeln verlangt, an denen Telegraphen- und Telephonleitungen gekreuzt werden und wo überhaupt irgend welche Behörden die Genehmigung zur Überspannung zu erteilen haben. Es genügen nicht allein einfache Schutznetze, vielmehr werden häufig kastenartige Geflechte verlangt, die, zumal wenn Schnee- und Eisdruck hinzutreten, die Gestänge ausserordentlich belasten. Ebenso bieten sie dem Wind eine bei weitem grössere Angriffsfläche,

Drehfeldgerät.¹⁾ Dasselbe wird von den die Freileitungen durchfliessenden Strömen mittelbar oder unmittelbar derart beeinflusst, dass nur ein pulsierendes, aber keine Kraftwirkung ausübendes Feld entsteht, wenn ein Teil der Strecke abgeschaltet wird. Im Falle eines Bruches tritt jedoch ein Drehfeld und demzufolge ein Drehmoment auf, welches zur Bethätigung einer Signaleinrichtung führt oder die sofortige Ausschaltung der betreffenden Strecke veranlasst.

Der Apparat (Fig. 195) besteht, ähnlich den Drehfeldmessgeräten, aus einem Ringe von unterteiltem Eisen mit drei nach innen vorspringenden zwei-

Drahtbruchrelais

— Drehrichtung jedes
einzelnen Poles
→ Drehrichtung des
Drehfeldes A B C

Spannungsschalter

Drehstrom-Netz



Fig. 195.

teiligen Polansätzen, deren Wicklungen unter Zwischenschaltung von Stromtransformatoren durch die Fernleitungen gespeist werden. Zwischen den Polansätzen und dem in der Mitte befindlichen Eisenkern ist eine leichte Metalltrommel t drehbar gelagert. Ein mit der Trommel verbundener Arm z berührt bei entsprechender Drehung den festen Anschlag f_1 oder die Feder f_2 , die bei Berührung mit f_1 einen Hilfsstromkreis schliesst.

Der Dreiphasenstrom übt in bekannter Weise ein Drehmoment in bestimmter Richtung auf die Trommel aus, das in vorstehender Figur im Sinne

1) D. R.-P. 130225. — Fortschritte der Elektrotechnik 1902, S. 2483.

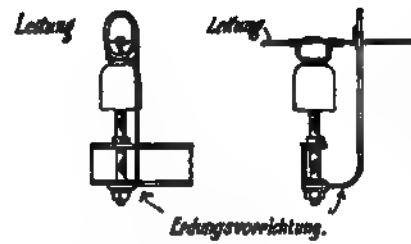


Fig. 196.

derartigen Vorrichtung hängt nun ganz und gar davon ab, wie gross der Erdungswiderstand ist, wobei zu berücksichtigen ist, dass in vielen Fällen bei weit ausgedehnten Fernleitungen eine gute Erdung überhaupt nicht oder nur unter grossen Kosten zu erreichen ist. Diese Anordnung wird daher nicht mehr angewendet.

127.
Gouldsche
Kupplung.

die Fernleitung in einzelnen Längen zwischen die Isolatoren gespannt, mit denen sie den Zusammenhang aufgeben, sobald eine Leitung reisst.

Diese von SIEMENS & HALSKE früher vertriebene Konstruktion wird in abweichender Form von der Gesellschaft für Strassenbahnbedarf, Berlin, verwendet;¹⁾ sie hat gegenüber den Schutznetzen den grossen Vorteil, dass sie nicht wie jene bei Reparaturen an den Leitungen hinderlich sind, auch keine grössere Belastung der Gestänge durch Schnee und Wind herbeiführen.

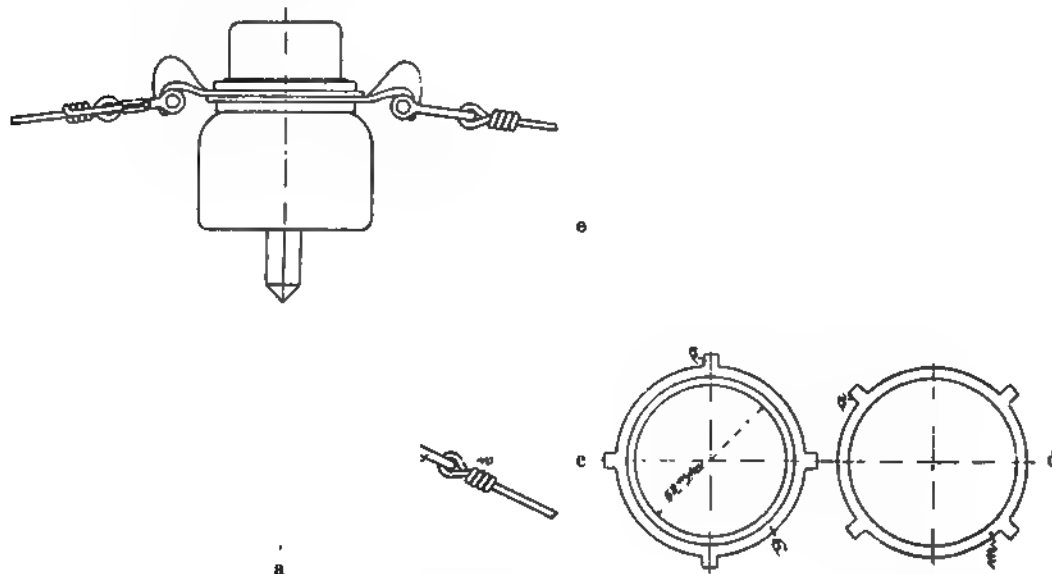


Fig. 197.

In Fig. 197a ist die Sicherheitskupplung auf einem Isolator montiert, in ca. $\frac{1}{4}$ natürlicher Grösse dargestellt. Einzelteile derselben sind in den Fig. 197b bis f abgebildet.

Die aus Rotguss hergestellte und verzinnnte Kupplung besteht aus einem Gewinding g mit Mutterring m (Fig. 197a, c und d), aus zwei Nasenringen r, r_1 (Fig. 197a und e), sowie aus zwei Bügeln b (Fig. 197a und b).

Der Gewinding g ist derart dimensioniert, dass er auf den Isolator aufgesteckt werden kann. Die Nasenringe r, r_1 sitzen auf dem Gewinding drehbar; der Mutterring m wird auf den Gewinding aufgeschraubt und gestattet ein Feststellen der Nasenringe r, r_1 . Um ein besseres Festziehen zu

1) DINGLERS Polytechnisches Journal 1899, Bd. 313, Heft 8.

Bei Verwendung dieser Sicherheitskupplungen müssen die Hochspannungsleitungen nebeneinander angeordnet werden, wie dies auch aus dem Zweck der Anordnung hervorgeht. Die Verteilung kann je nach Wunsch, Anzahl der Leitungen, lokalen Verhältnissen u. s. w. erfolgen. Auch kann die Anbringung von Telephonleitungen an den Gestängen stattfinden, wenn ein entsprechender Abstand von der Hochspannungsleitung eingehalten wird und zur Vermeidung von Induktionswirkungen etwa an jedem zehnten bis zwanzigsten Gestänge die Hochspannungsleitungen gekreuzt werden.

Die nachfolgenden Tabellen No. 8 A, B, C geben eine vergleichende Übersicht der Kosten von Hochspannungsanlagen mit Sicherheitskupplungen gegenüber denen mit Schutznetzen.

Tabelle No. 8.

A. 1 km Strecke mit 3 Leitungen	Mit	Mit
	Sicherungen	Schutznetz ausgerüstet
30 Holzmaste, einschl. Setzen derselben	1100	1100
Streben und Anker, einschl. Anbringen	100	100
12 Blitzableiter, 3×4 Stück, Material und Anbringen	360	360
90 Hochspannungsisolatoren mit Stützen, Schienen und Installation	360	360
3150 m Leitungsdraht, 35 mm ² , Kupfer	3150	3150
90 Sicherheitskupplungen für 1000 kg Zugfestigkeit	720	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Kupplungen	135	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Schutznetzen	—	90
Kleinmaterialien für die Leitungsdrahtmontage	5	15
Rot. 1 km Schutznetz nebst allem Zubehör und der fertigen Montage ¹⁾	—	1800
Allgemeine Kosten, Materialbeförderung, Aufsicht u. s. w.	500	500
	6430	7475

B. 1 km Strecke mit 6 Leitungen	Mit	Mit
	Sicherungen	Schutznetz ausgerüstet
30 Holzmaste, einschl. Setzen derselben	1100	1100
Streben und Anker, einschl. Anbringen	100	100
24 Blitzableiter, 6×4 Stück, Material und Anbringen	650	650
180 Hochspannungsisolatoren mit Stützen und Schienen	700	700
6300 m Leitungsdraht, 35 mm ² , Kupfer	6300	6300
180 Sicherheitskupplungen für 1000 kg Zugfestigkeit	1440	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Kupplungen	270	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Schutznetzen	—	180
Kleinmaterialien für die Leitungsdrahtmontage	10	30
Rot. 1 km Schutznetz nebst allem Zubehör und der fertigen Montage ¹⁾	—	1800
Allgemeine Kosten, Materialbeförderung, Aufsicht u. s. w.	750	750
	11320	11610

1) Die Kosten der Schutznetze schwanken bekanntlich sehr, je nach der Maschenweite, Anordnung u. s. w.; hier ist ein niedriger Mittelpreis für das Schutznetz angenommen und zu diesem dann der Aufschlag in derselben prozentualen Höhe getreten, wie bei den übrigen Gegenständen bezw. Preisen (siehe DINGLERS Pol. Journal 1899).

Sonstige Vorrichtungen, welche ein Herabfallen der Freileitungen vermeiden sollen.

129.
Fangbügel.

An Winkelpunkten kann durch das Platzen von Isolatoren herbeigeführt werden, dass Leitungen herunterhängen. Zwar werden dieselben an der Innenseite des Isolators festgebunden, dieser selbst auch so auf der Stütze befestigt (Fig. 160), dass der Draht, auch wenn der Isolatorkopf abplatzt, von der Stütze aufgefangen werden kann. Hat nun aber der Draht starken Drall, so ist es trotzdem nicht ausgeschlossen, dass er über die Stütze hinwegschlägt. Aus diesem Grunde werden an solchen Stellen Fangbügel angeordnet, die, wie Fig. 169 b u. 183 zeigen, über die Leitungen hinwegfassen. Eventuell können diese Fangbügel auch noch geerdet sein.

130.
Schutznetze.

Weitgehende Verwendung finden Schutznetze, die ihrer Form nach als offene und als geschlossene verwendet werden und den fallenden Draht auffangen sollen. Um dies sicher zu thun, müssen sie, wenn offen konstruiert, mindestens eine solche Breite haben, dass eine zwischen dem höchsten Leiter und dem Rande des Schutznetzes gezogene Linie gegen die Vertikale einen Winkel von etwa 45° bildet.

Schutznetze werden entweder fertig bezogen und bestehen dann aus Drahtgeflechten verschiedener Form oder sie werden an Ort und Stelle hergestellt, indem zwischen eisernen, an den Masten angebrachten Traversen Längsdrähte gespannt werden, die dann unter sich durch Querdrahte verbunden werden. Die Längsdrähte bestehen aus verzinktem Eisendrahtseil, dessen Stärke 5 mm nicht unterschreiten sollte. Wird Stahldrahtseil verwendet, so könnte ein entsprechend geringerer Durchmesser zugelassen werden. Die Querdrahte wähle man nicht unter 2,5 mm Durchmesser und spanne sie in Zwischenräumen von mindestens etwa 1 bis 1,5 m. Sie werden am Längsdraht festgeklemmt oder festgelötet. Die Querdrahte werden an ihren Enden in die Höhe gebogen, so dass die auf das Netz fallende Leitung nicht seitlich abrutschen kann. Zum gleichen Zweck können statt der glatten Querdrahte spiralförmige gewählt werden.

Bei geschlossenen Schutznetzen werden die Längsdrähte unterhalb und oberhalb der Leitungen angeordnet, die ebenso, wie vorher beschrieben, ringsherum durch Querdrahte verbunden werden.

In den Figuren 199 a—g werden nach Konstruktionen von SIEMENS & HALSKE-Wien verschiedene Schutzdraht- und Schutznetzträger gezeigt, die auf Masten befestigt werden. Bemerkenswert ist die Form und Art der Querdrahte, wie sie aus Fig. 199 g hervorgeht. Dieselben werden vorher über einer Schablone gebogen und später nur über die Längsdrähte gehangen und dort befestigt.

Offene Schutznetze werden in Entfernungen von etwa 50 bis 60 cm unterhalb der Leitungen angebracht. Bei geschlossenen muss jedoch darauf Rücksicht genommen werden, dass durch die Wahl eines grossen Abstandes der Schutznetze von den Leitungen auch die Kosten entsprechend wachsen und dieser daher möglichst nur so weit gewählt werde, wie es die Betriebssicherheit unbedingt verlangt. Als für alle Spannungen ausreichend kann eine senkrechte Entfernung zwischen Leitung und Schutznetz von 40 cm und eine Horizontale von etwa 30 cm angesehen werden. Sind die Spannweiten gering, so dass ein starkes Pendeln der Leitungen nicht erwartet werden

boden oder von Gebäuden aus ohne besondere Hilfsmittel nicht erreichbar sind. Dies wird auf freier Strecke ohne weiteres dadurch erreicht, dass die oben für Niederspannungen angegebenen Entfernungen auf 6, bei Wegübergängen auf 7 m als Minimum erhöht werden. In der Regel werden Hochspannungsleitungen aber bedeutend höher verlegt, da teilweise unter ihnen Schutznetze angeordnet werden müssen und dann von der Erdoberfläche bis zu diesen die angegebenen Masse innezuhalten sind.

132.
Mast-
abstände.

Bei Aufstellung von Holzmasten dürfen in geraden Strecken folgende Maximalabstände nicht überschritten werden. Für Leitungen mit einem Gesamtquerschnitt von 100 bis 200 mm² = 40 m, von 200 bis 300 mm² = 35 m, darüber = 30 m. Bei Kreuzungen mit anderen Leitungen, Eisenbahnen, Wegen u. s. w., sowie bei Kurven müssen die Abstände der Stangen geringer, den Umständen entsprechend, gewählt werden.

In Kurven darf aber der resultierende Drahtzug den Grenzwert

$$\frac{k W}{L}$$

nicht überschreiten, worin für den kreisförmigen Querschnitt

$$W = \frac{\pi}{32} D^3$$

zu setzen ist.

Der resultierende Zug aus den Leitungszügen zu beiden Seiten der Stange ergibt sich ¹⁾ zu

$$R = 2 P \cos \frac{\alpha}{2}.$$

α ist gleich dem Winkel, welchen die Leitung einschliesst, wenn der Eckmast als Scheitelpunkt angenommen wird.

Es ergibt sich somit

$$\frac{k W}{L} = 2 P \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Aus der Entfernung der Mastabstände l und dem Kurvenradius r ergibt sich

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{l}{2r}$$

und somit der äusserst zulässige Mastenabstand in Kurven

$$l = \frac{r k W}{P L}.$$

Bei Flussübergängen u. s. w., wo grössere Abstände der Stangen notwendig sind, müssen, ebenso wenn der Gesamtquerschnitt der Leitungen grösser als 300 m² ist, entweder Stangen von stärkeren Dimensionen oder gekuppelte Stangen verwendet werden.

Kurze Stangen untereinander zu einer längeren zusammenzusetzen ist nicht statthaft. Stangen mit geringerer Zopfstärke als 15 cm sind nur für Niederspannung bis 250 Volt gegen Erde zulässig. Für Hochspannung müssen die Stangen mindestens 18 cm Zopfstärke haben. Bei Verwendung eiserner Maste werden die Spannweiten im allgemeinen etwas weiter gewählt, je nachdem die Festigkeit derselben dies zulässt.

1) Vgl. S. 138 dieses Bandes.

Grosse Spannweiten in Freileitungen.

Nicht immer ist es möglich, für die Freileitungen die nötigen Stützpunkte zu schaffen, insbesondere bei der Überbrückung von Flüssen und Schluchten. Entsprechend der grösseren Belastung genügt schon bei nicht allzu grossen Entfernungen eine Verstärkung des Leitungsmaterials nicht mehr, sondern man muss besondere Tragseile anordnen, die ab und zu mit der Leitung verbunden und darum gegen Erde ebenso sicher isoliert sein müssen, wie die Leitung selbst (Fig. 200).¹⁾

Nicht immer wird eine Überspannung möglich sein; man muss dann Kabel unterirdisch verlegen und diese beiderseits an die Freileitungen anschliessen unter Einschaltung geeigneter Blitzschutzvorrichtungen.²⁾ Bei sehr

133.
Verschiedene Arten
der Überspannung.

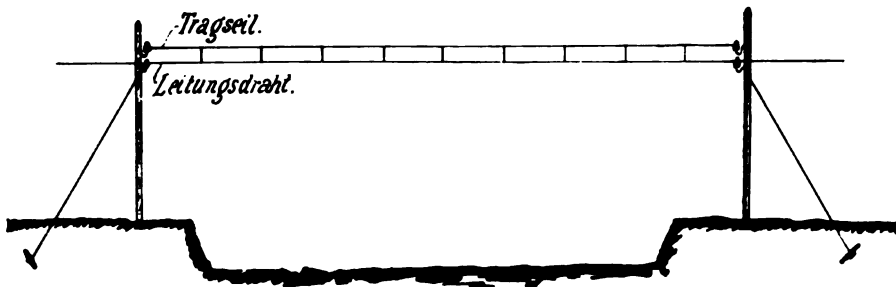


Fig. 200.

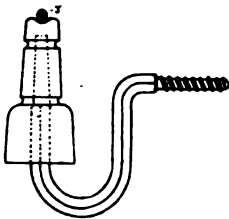


Fig. 201.



Fig. 202.

hohen Spannungen wird auch dieses Mittel versagen und es bleibt nichts anderes übrig, als auf der einen Seite der zu überspannenden Strecke den Strom auf eine Spannung herunter zu transformieren, für welche Kabel geliefert werden und auf der anderen Seite wieder auf die Streckenspannung zu bringen.

Um eine erhöhte Festigkeit in den Leitungen zu erzielen, ist vielfach versucht worden, eine Kombination von Stahl und Bronze, sogenannten Bimetalldraht,³⁾ zu verwenden. Infolge des verhältnismässig hohen Leitungswiderstandes hat diese Methode aber nur geringe Anwendung gefunden. Die genannten Übelstände lassen sich aber, wie nachstehend beschrieben, auf einfache Art vermeiden.

Man verwendet⁴⁾ einen in Fig. 201 dargestellten Isolator, welcher gestattet, auf der oberen Kopfnute einen Stahldraht *T* mit Oberbund zu befestigen. Dieser Trägerdraht wird mit einem Durchhang gespannt, welcher

1) Gezeichnet nach einer Abbildung in MILLER: Versorgung der Städte mit Elektrizität.

2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 413.

3) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 157.

4) EA 1901, S. 1774.

nicht tiefer herabreicht, als die gerade Linie, welche man sich zwischen den Seitenbundnuten S_1 und S_2 (Fig. 202) gezogen denkt. An den letzteren wird dann die eigentliche Leitung aus Kupfer, Siliciumbronze oder Aluminium durch Seitenbund befestigt. Je nach den Mastabständen verbindet man die Leitung an mehreren Stellen mit dem Trägerdraht. Durch diese einfache Anordnung erzielt man ein solides und äusserst haltbares Freileitungssystem.

Auf freier Strecke gestattet diese Anordnung ausserdem die Aufstellung einer geringeren Anzahl von Masten, also grössere Spannweiten, so dass eine wesentliche Kostenersparnis eintritt. Der Stahldraht kann ferner als Prüf- oder Voltmeterleitung benutzt werden, wenn man die Verbindung zwischen Trag- und Leitungsdraht durch Isolierstücke herstellt, während sonst für diesen Zweck besondere Isolatoren und Leitungen erforderlich sind. Anderenfalls kann man aber den Tragdraht auch zur Leitung mitbenutzen und dementsprechend den Kupferdraht schwächer dimensionieren.

Als Isolierstücke liefert die Porzellanfabrik GEBRÜDER SCHÖNAU in Hüttensteinach i. Thür. kleine ei- oder melonenförmige Isolatoren, die mit Vorteil für diesen Zweck verwendet werden können. Der in Fig. 201 abgebildete Isolator wird von der gleichen Fabrik hergestellt, und zwar für Spannungen bis zu 5000 Volt und Leitungsquerschnitte bis 70 mm².

Vielfach können in den Tropen Maste überhaupt nicht gestellt werden; es ist dann die folgende Art der Leitungsbefestigung üblich, die aber nur Verwendung finden kann, wenn genügend Stützpunkte (Bäume, Felsen u. s. w., wenn auch in grösserer Entfernung) vorhanden sind. Die Verlegung erfolgt auf Isolatoren, welche von dreieckigen Bügeln getragen und welche letztere mit Hilfe von stählernen Spanndrähten aufgehängt werden. Sie sind in Fig. 203 erläutert. Durch diese Anordnung ist es möglich, auch da Stützpunkte zu schaffen, wo man nicht mit anderen Hilfsmitteln hingelangen kann, und die Leitung selbst läuft ohne Krümmung oder auch in beliebigen Kurven ihren Weg.

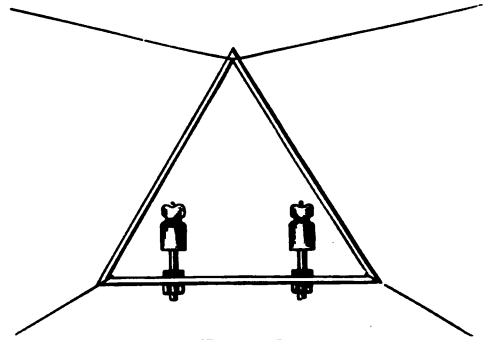


Fig. 203.

134.
Beschreibung
zweier
Über-
spannungen
von grosser
Spannweite.

Eine Stromleitung von grosser Spannweite wurde kürzlich in Amerika über den Monongahelafluss verlegt. Die Entfernung der beiden Leitungstürme, welche zu jeder Seite des Flusses errichtet sind, beträgt rund 300 m. Die zwischen ihnen gespannte Leitung besteht aus zwei Aluminiumseilen, welche an den aus Stahl konstruierten Türmen fest verankert sind. Den angestellten Berechnungen wurden folgende Verhältnisse zugrunde gelegt. Die Netzspannung beträgt 250 Volt, der zu übertragende Strom 800 Amp. und der zugelassene Spannungsabfall 40 Volt. Als maximaler zulässiger Durchhang werden bei 100° C. 10 m, für zu erwartende Windpressung 190 kg pro Quadratmeter, für die niedrigste Temperatur - 7° C. und für die zu erwartende Eisschicht auf den Kabeln eine solche von 6 mm Dicke angenommen. Die zulässige Zugspannung des verwendeten hartgezogenen Aluminiumdrahtes wurde zu 2500 kg pro Quadratcentimeter ermittelt, die Leitfähigkeit zu 63 verglichen mit derjenigen von Kupfer, wenn dessen Leitfähigkeit mit 100 fest-

Türmen befestigt, sondern sie sind auf diesen über Rollen und über diese hinweg an beiden Enden zu einer Verankerung geführt, an der ein Zug von 12000 kg auf jedes Kabel ausgeübt wird, während der auf die Turmauflagerungen wirkende Druck je 3175 kg beträgt. Die Verankerungen bestehen aus schweren, massiven Blöcken, welche tief in die Erde versenkt sind und durchgehende Ankerbolzen besitzen.

Es sind zwei Arten von Isolatoren bei dieser Überführung verwendet, und zwar Sattelisolatoren (Fig. 204) auf den Türmen, die das Gewicht der Kabel tragen, sowie Spannisolatoren (Fig. 205), welche die Kabel gegen die Verankerungen isolieren und den ganzen Zug aufnehmen. Die Sattelisolatoren bestehen aus glasiertem Porzellan und wurden durch Zusammenkitten von vier einzelnen Porzellanschalen und einem starken konischen, in die mittlere derselben eingeschweißten Stahldübel gebildet; über diesen Stahldübel greift die entsprechend konisch gestaltete innere Porzellanschale. Das Gewicht

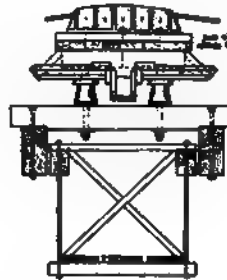


Fig. 204.

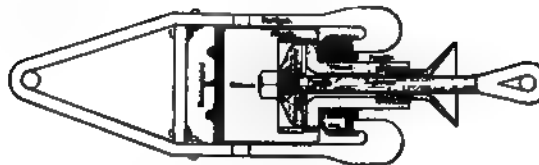


Fig. 205.

dieses Isolators beträgt 34 kg ausschliesslich des Dübels; der Durchmesser am äusseren Mantel misst 43 cm. Sechs solcher Isolatoren in einer Gruppe tragen eine hölzerne Plattform mit sechs tiefen, über die Körper der Isolatoren greifenden Löchern. Ein Regendach schützt die Isolatorengruppe gegen Treibregen, eine Rinne dient zur Ableitung des sich ansammelnden Wassers. Oben auf der Plattform befindet sich das gusseiserne Lagerstück, welches fünf in einer Reihe drehbar angeordnete genutete Stahlrollen trägt. Das Kabel ruht frei auf diesen Rollen, so dass eine Bewegung desselben nicht gehindert wird.

Die Konstruktion der Spannisolatoren brachte erheblichere Schwierigkeiten. Es stellte sich heraus, dass die Porzellanfabrikanten die in Bezug auf Festigkeit geforderten Bedingungen nicht erfüllen konnten und man wählte Mikanit. Die Durchschnitzzeichnung Fig. 205 veranschaulicht die Konstruktion des Isolators deutlich. Das konisch gestaltete Porzellanrohr sichert eine reichliche Oberflächenisolation zwischen dem Zugbolzen und dem Stahlring, während das im Innern des Kupferbehälters befindliche Öl ausser der Isolation gleichzeitig die Entstehung eines Lichtbogens zwischen gegenüber-

An den Doppelständern müssen die Isolatoren übereinander angeordnet werden, lieber stellt man sie nebeneinander und zieht dann das in Fig. 206 b wiedergegebene Doppelgestänge vor, auf dessen oberer Querverbindung die Isolatoren befestigt werden.

187. Statt doppelter Stangen werden häufig Verankerungen und Streben verwendet.

Erstere bestehen meistens aus verzinktem Eisendrahtseil, welches am Mast, etwa in $\frac{2}{3}$ seiner Höhe so befestigt wird, dass es nicht abrutschen kann; im Erdboden wird es in einer Tiefe von etwa 1 m verankert, sei es durch ein quergelegtes Holz, sei es durch Erdbohrer. Mit Hilfe eines zwischen

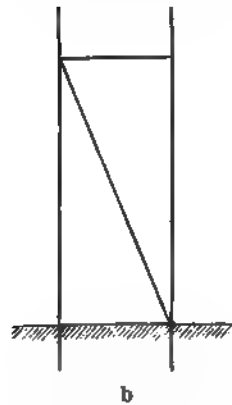
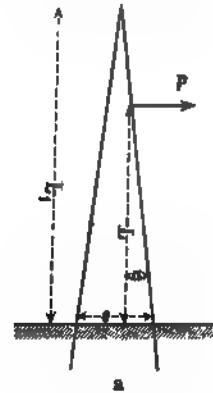


Fig. 206.

1

Fig. 207.

die einzelnen Drähte des Seiles gesteckten Knebels wird es dann verdreht und hierdurch der Mast angespannt.

Streben werden in der Zugrichtung gegen den Mast gelegt und mit ihm verbolzt. Der Mast darf aber nicht eingeschnitten werden. Eventuell kann durch einen übergelegten eisernen Winkel die Verbindung hergestellt werden (Fig. 207). Statt der Streben werden bisweilen in Kurven die Doppelständer (Fig. 206) verwendet und diese so gestellt, dass die Richtung des resultierenden Zuges in die Mitten beider Stangen fällt. Nun ist es häufig nicht nur in Kurven, sondern auch in geraden Strecken erforderlich, die Maste zu verankern, nämlich dann, wenn häufig auftretende seitliche Winde die Strecke sehr stark angreifen. An besonders ungünstigen Stellen, insbesondere an Strassen und Wegübergängen, werden daher beiderseits sogar Verankerungen

In Anbetracht einer sorgfältigen Überwachung kann auch sehr empfohlen werden, das Datum der Einsetzung am Holzmast einzubrennen.

Maste oder Schutzverkleidungen von Leitungen, welche eine absolute Spannung von mehr als 500 Volt führen, müssen durch einen deutlich sichtbaren roten Zickzackpfeil (Blitzpfeil) gekennzeichnet sein.¹⁾

139.
Einsetzen
der Maste.

Je nach Beschaffenheit des Bodens und der Länge der Maste sind dieselben einzugraben, und zwar in der Regel etwa mit $\frac{1}{5}$ ihrer Länge, mindestens aber 1·5 bis 2·5 m tief und darauf gut zu verrammen. In welchem Boden sind die Stangen einzubetonieren. Gern wird ihnen im Erdreich eine grössere Oberfläche, etwa durch Anbringen von Wellblech oder dergleichen gegeben, damit sie den seitlichen Zug besser aufnehmen können.

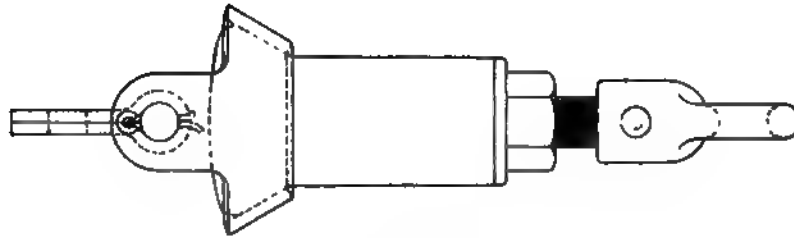


Fig. 209.

Eventuell kann auch durch die Anhäufung grösserer Steine die Festigkeit erhöht werden.

140.
Blitzschutz
für Frei-
leitungen.

Freileitungen sind,²⁾ den örtlichen Verhältnissen entsprechend, durch Blitzschutzvorrichtungen zu sichern, die auch bei wiederholten Entladungen wirksam bleiben. — Diese „Blitzschutzvorrichtungen“ haben aber nicht den Zweck, direkte Blitzschläge unschädlich zu machen, ihre weit wichtigere Aufgabe ist die Unschädlichmachung mannigfacher atmosphärischer Entladungen auch ohne direkte Blitzerscheinung, sowie der im Betrieb einer Hochspannungsanlage auftretenden Überspannungen.³⁾

Allgemein gesagt scheinen sich für Hochspannungsanlagen Hörnerblitzableiter⁴⁾ und für Niederspannung Schutzvorrichtungen mit magnetischer Funkenlöschung⁵⁾ am besten zu bewähren. In welcher mannigfachen Art die Vorschrift, dass die Schutzvorrichtungen auch nach erfolgter Entladung

1) Näheres siehe C. L. WEBER: Erläuterungen, 6. Aufl., S. 85, Anm. 2.

2) § 23 f Niederspannung und § 23 o Hochspannung der Sicherheitsvorschriften.

3) Hdb. VI, 1, S. 376 f.

4) Hdb. VI, 1, S. 406 f.

5) Hdb. VI, 1, S. 401 f.

wirksam bleiben sollen, zu lösen versucht worden ist, wurde an anderer Stelle¹⁾ ausführlich behandelt.

An welchen Stellen einer Freileitung eine Schutzvorrichtung eingebaut werden soll, lässt sich ohne das sorgfältigste Studium an Ort und Stelle kaum feststellen, da auch die klimatischen und Bodenverhältnisse, Bewaldung u. s. w. von der einschneidendsten Bedeutung sind. Während manche ausgedehnten Fernstrecken unter Entladungen fast gar nicht zu leiden haben, sind andere zeitweise genötigt, den Betrieb einzustellen, insbesondere an schwülen Sommertagen.

In der Regel werden die Schutzvorrichtungen am Beginn und am Ende der Strecken angebracht und weitere auf der Strecke verteilt.²⁾ Vor die betreffenden zu schützenden Stromverbraucher sind Drosselspulen zu schalten.

141.
Anbringung
von Appa-
raten in
Freileitun-
gen.

Die Apparate, welche in Freileitungen am häufigsten einzuschalten sind, sind Sicherungen und Schalter. Die ersteren sind an Abzweig- und Verteilungspunkten erforderlich, die letzteren werden für Hochspannung durch § 23 I der Sicherheitsvorschriften verlangt.

Die näheren Angaben für Sicherungen sind bereits im Hdb. VI, 1, S. 315 f., für Schalter im Hdb. VI, 1, S. 191 f. gegeben.

Sie müssen so angeordnet werden, dass sie ohne besondere Hilfsmittel nicht erreichbar, also in gewisser Höhe oder gegen Berührung geschützt angebracht sind (vgl. Fig. 256, Hdb. VI, 1). Ersteres ist jedoch nicht immer wünschenswert. Man bringt diese Apparate gern in handliche Höhe, muss aber dann zum persönlichen Schutz verschlossene sichere Behälter verwenden, in denen dieselben montiert werden (Fig. 210).

In erhöhtem Masse ist der gleiche Schutz auch da anzubringen, wo Teile der Freileitungen in von Gebäuden erreichbarer Nähe vorbeiführen.

Freileitungsmaterial der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

142.
Allgemeines.

Von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft ist das im nachstehenden beschriebene Installationsmaterial für die Verwendung von Aluminium- als auch Kupferleitungen konstruiert worden; es zeigt einige charakteristische Einzelteile, vermöge deren jede der beiden Leitungsarten ohne Änderungen angewendet werden kann.

Man kann nicht allein Zentral-Verteilungsstellen, sondern auch Abzweigungen, Übergangsstellen und Hausanschlüsse montieren, und zwar an Rohr-, Gitter- und Holzmasten, auf Dächern und an Hauswänden. Bei Übergängen von unter- zu oberirdischen Leitungen oder umgekehrt treten einige Modifikationen ein, unter denen aber die Einheitlichkeit des Materials nicht beeinträchtigt wird. —

Bei der Konstruktion des Materials ist darauf Rücksicht genommen, die naturgemäss auftretenden Zugbeanspruchungen derart gleichmässig innerhalb der Befestigungspunkte einer Verteilungsstelle zu gruppieren, dass weder Isolatorbrüche, noch Verzerrungen des Systems, wie solche bei einseitiger Beanspruchung möglich sind, vorkommen können. Im weiteren musste man

1) Hdb. VI, 1: Schutzvorrichtungen gegen Überspannungen und atmosphärische Entladungen, S. 375.

2) Hdb. VI, 1, S. 421, 424, 426.

Fig. 224.

Fig. 225.

Auch die Befestigung der die Sicherungen tragenden Isolatoren erfolgt in der gleichen Art am unteren Ring. Über dem Sicherungsring, aber innerhalb der für die Sicherungen bestimmten Isolatoren, sind **Sammelringe** angebracht, die durch Verbindungslaschen, die gleichzeitig als Träger dieser Ringe dienen, mit den Sicherungen verbunden sind. Für Drehstromnetze werden drei Sammelringe verwendet; für Netze, in denen nur zwei Ringe erforderlich sind, wird der innerste entfernt. Die Sammelringe sind, um sie ebenfalls an jeder Stelle, um den Mast legen zu können, an einer Stelle aufgeschnitten. Alle Verbindungen sind durch Klemmvorrichtungen hergestellt, um Lötungen zu vermeiden.

Vorteilhaft lässt sich dieses System auch bei der Überführung von Kabeln zu Freileitungen verwenden, wenn eiserne Maste verwendet werden, in deren Innerem das Kabel bis zu dem am Kopf des Mastes angebrachten Kabelendverschlusse geführt wird, der dann mit den Sammelringen in leitende Verbindung gebracht wird.

146.
Gestänge.

Wertvoll ist das von dieser Firma besonders ausgebildete System von Isolatorenträgern, welches besonders für die Installation von Freileitungen

Fig. 226.

an Gebäuden gute Dienste leistet. Besonders bemerkenswert ist es, weil es aus einzelnen Elementen besteht, die in beliebiger Form zusammengesetzt werden können. Aus den Fig. 224—226 gehen die Einzelheiten ohne weiteres hervor. Die Gestänge, welche Fig. 224 zeigt, sind für Holzmaste bestimmt, die in Fig. 225 wiedergegebenen für die Befestigung an Häuserfronten. Bei diesen sind zwischen den eigentlichen Isolatorenträgern und die Wand noch besondere Befestigungseisen geschoben, die bei der Anordnung für die Maste fehlen. Infolge dieser Anordnung ist es aber möglich, mit den Leitungen an den normalen Vorsprüngen der Häuser vorbei zu kommen. Treten diese jedoch aussergewöhnlich weit hervor, so können Verlängerungen durch Zwischenschaltung der in Fig. 224 u. 225 gezeigten normalen Stücke h hergestellt werden und es entsteht dann ein Gestänge nach Fig. 226.

Diese normalen Stücke können auch zu Verteilungspunkten zusammengestellt werden unter Hinzufügung weniger weiterer Bestandteile. So zeigt Fig. 227 an der Ecke eines Hauses angebrachte Anordnungen in schematischer Darstellung.

Fig. 228 zeigt die Konstruktion der Freileitung in der Anlage des Elektrizitätswerkes Maria-Theresienstadt unter Verwendung dieses Materials.

dass die erstere als konstante Spannungswirkung, die letztere als konstante Stromwirkung auftritt. Daher sind praktisch bei telephonischen Empfängern mit verschiedenem Widerstande die Amperewindungen, bezogen auf die elektromagnetische Induktion, gleich, während sie bei der elektrostatischen Induktion mit der Zahl der Windungen anwachsen und dadurch auch der Widerstand des Empfängers. Die elektrostatische und elektromagnetische Wirkung wird bei Anordnung nach Fig. 229 ungefähr gleich, wenn a, b, c eine Leitung ist, die 50 Amp. bei 20 000 Volt führt und wenn der Telephonstromkreis einschliesslich der Empfänger einen Gesamtwiderstand von 1000 Ohm hat.

Neuerdings hat das Brückentelephon fast ganz den Platz des Serieninstrumentes in jedem Telephonwerk eingenommen, und zwar ist das letztere besonders unzulässig für den Gebrauch in einem Stromkreise, in welchem die statische Induktion eine ziemlich grosse Ausdehnung annehmen kann. Den Grund hierfür zeigt Fig. 230. Die Fernsprechleitung m habe zwischen A und B eine induzierte positive Ladung und zwischen B und C eine negative.

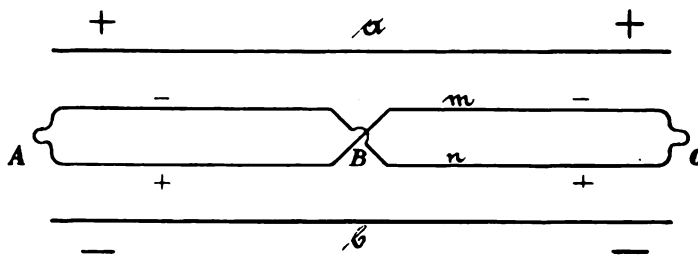


Fig. 230.

Es fliesst daher beim Kreuzungspunkt B ein Strom in m von einem Teil zum anderen.

Wenn nun bei B ein Serientelephon in Reihe mit m eingeschaltet wird, so wird es nicht allein durch den Ladungsstrom zwischen den beiden Teilen von m , sondern auch durch die bestehende Spannungsdifferenz beeinflusst und infolgedessen störende Ströme in Telephonen sowohl bei A als auch bei C erzeugt.

149.
Kreuzungs-
systeme.

Die Art der Verdrillung der Starkstromleitungen kann auf die folgenden Arten ausgeführt werden. Sie erfolgt von Mast zu Mast, wie Fig. 231 a zeigt. Die Isolatoren werden abwechselnd gesetzt, wie die Skizze andeutet, um ein bequemes Kreuzen zu ermöglichen. Immer auf dem ersten und siebenten Mast haben die Leitungen die gleiche Lage, so dass eine vollständige Verdrillung nach sechs Wechslen vollendet ist. Bei weiten Fernstrecken ist es nicht erforderlich, die ganze Strecke zu verdrillen, es genügt eine mehrfache Verdrillung. Statt der in Fig. 231 a gezeigten Art der Verdrillung kann unter Zuhilfenahme einer grösseren Anzahl von Isolatoren der Leitungswechsel am Mast selbst vorgenommen werden, wie Fig. 231 b und c¹⁾ zeigen.

Wenn auch durch ein geeignetes Kreuzungssystem²⁾ die Bildung einer induzierten elektromotorischen Kraft zwischen den beiden Telephondrähten verhütet wird, kann dadurch doch nicht gänzlich verhindert werden, dass die beiden Drähte eine Spannung annehmen, die gegen das Erdpotential ab-

1) MILLER, Die Versorgung der Städte mit Elektrizität.

2) Vgl. ETZ 1888, S. 110.

weicht. In einem richtig gekreuzten System hat jeder Telephondraht dieselbe mittlere Entfernung von jeder Kraftübertragungsleitung und es ist daher die Spannung, welche das Telefonsystem durch die statische Induktion anzunehmen versucht, die des neutralen Punktes des Kraftsystems. Unter neutralem Punkt ist die Stelle zu verstehen, an welcher gegenüber der Kraftübertragungsleitung die gleiche mittlere elektromotorische Kraft herrscht. Wenn der neutrale Punkt der Kraftübertragungsleitung in der Spannung gegen Erde differiert, wird eine elektrostatische Spannungsdifferenz versuchen, zwischen Erde und den Telephondrähten aufzutreten, und es wird dieser Fall eintreten, wenn die Isolation des Telephonstromkreises vollkommen ist.

Die Höhe dieser elektrostatischen Spannung zwischen dem Telephonstromkreise und der Erde hängt von der relativen Kapazität zwischen Kraft- und Telephonleitung einerseits und zwischen Telephonleitung und Erde ander-

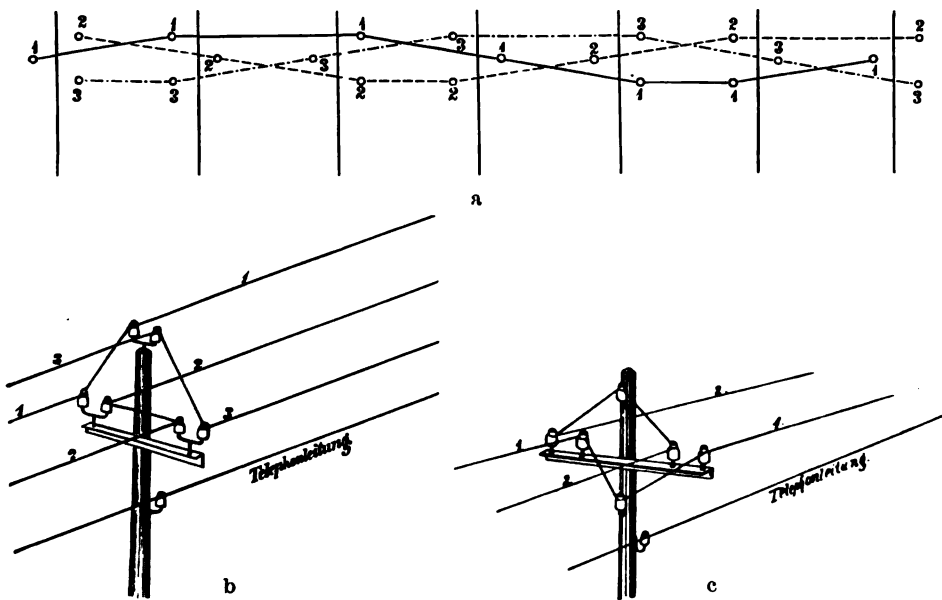


Fig. 231.

seits ab. Erstere können als entgegengesetzte Platten eines Kondensators, letztere als solche eines zweiten Kondensators bezeichnet werden. Sind diese beiden Kondensatoren in Serien geschaltet, so verteilen sich die gesamten elektromotorischen Kräfte im umgekehrten Verhältnis zu ihrer Kapazität. Die Spannung der Telephondrähte gegen Erde kommt dann wenigstens der Hälfte der Spannung des neutralen Punktes der Kraftleitung gegen Erde gleich. Es kann daher eine geerdete Kraftleitung zwischen den Telephondrähten und der Erde eine Spannung hervorrufen, welche gut Tausende von Volt erreichen kann und ebenso kann ein schlechter Isolator eine elektromotorische Kraft zur Folge haben, die Hunderte von Volt aufweist. Im Zusammenhange hiermit werden in den meisten Fällen die Telephone unwirksam, wenn ein Erdschluss in der Kraftleitung auftritt, denn es werden Telephonleitungen gebaut, die eine Spannung von nur 5000 oder 10 000, ja sogar nur 1000 Volt gegen Erde aushalten. Die höchste Spannung tritt nicht zwischen den

1. Für die mit elektrischen Starkströmen zu betreibenden Anlagen müssen die Hin- und Rückleitungen durch besondere Leitungen gebildet werden. Die Erde darf als Rückleitung nicht benutzt oder mitbenutzt werden. Auch dürfen in Dreileiteranlagen die blank in die Erde verlegten oder mit der Erde verbundenen Mittelleiter Verbindungen mit den Gas- oder Wasserleitungsnetzen nicht erhalten, wenn die vorhandenen Reichstelegraphen- oder Fernsprechleitungen mit diesen Netzen verbunden sind.

2. Die Hin- und Rückleitungen müssen in so geringem, überall gleichem Abstände voneinander verlaufen, als die Rücksicht auf die Sicherheit des Betriebes zulässt.

3. An den oberirdischen Kreuzungsstellen der Starkstromleitungen mit den Reichstelegraphen- und Fernsprechleitungen müssen entweder die Starkstromleitungen auf eine ausreichende Länge — mindestens in dem in Betracht kommenden Stützpunktszwischenraum — aus isoliertem Drahte hergestellt werden oder es müssen bei Verwendung blanken Drahtes Schutzvorrichtungen (geerdete Schutznetze u. s. w.) angebracht werden, durch welche eine Berührung der beiderseitigen Drähte verhindert oder unschädlich gemacht wird. Die Verwendung isolierten Drahtes für die Starkstromleitungen ist jedoch nur dann als ausreichender Schutz zu betrachten, wenn die normale Betriebsspannung 1000 Volt nicht übersteigt. Der Abstand der Konstruktionsteile der Starkstromanlage von den Schwachstromleitungen darf in vertikaler Richtung nicht weniger als 1.25 m betragen.

Die Kreuzungen haben thunlichst im rechten Winkel zu erfolgen.

4. An denjenigen Stellen, an welchen die Starkstromleitungen neben den Schwachstromleitungen verlaufen und der Abstand der Stark- und Schwachstromdrähte voneinander weniger als 10 m beträgt, sind Vorkehrungen zu treffen, durch welche eine Berührung der Stark- und Schwachstromleitungen sicher verhütet wird. Beträgt die Betriebsspannung in der Starkstromanlage nicht mehr als 1000 Volt, so kann als Schutzmittel isolierter Draht verwendet werden. Von dieser Bedingung kann abgesehen werden, wenn die örtlichen Verhältnisse eine Berührung der Stark- und Schwachstromleitungen auch beim Umbruch von Stangen oder beim Herabfallen von Drähten ausschliessen.

5. Die isolierende Hülle des nach Punkt 3 und 4 zu benutzenden isolierten Drahtes darf nicht durchschlagen werden, wenn sie einer Spannung ausgesetzt wird, welche das Doppelte der Betriebsspannung beträgt.

6. Die unterirdischen Starkstromleitungen müssen thunlichst entfernt von den Reichstelegraphen- und Fernsprechkabeln, womöglich auf der anderen Strassenseite, verlegt werden.

Werden Reichstelegraphen- oder Fernsprechkabel von Starkstromkabeln gekreuzt oder verlaufen die Kabel in einem seitlichen Abstände von weniger als 50 cm nebeneinander, so müssen die Starkstromkabel auf der den Schwachstromkabeln zugewendeten Seite mit Cementschuttmuffen von wenigstens 6 cm Wandstärke versehen und innerhalb dieser in Wärme schlecht leitendes Material (Lehm u. dergl.) eingebettet werden. Die Muffen müssen 50 cm zu beiden Seiten der gekreuzten Schwachstromkabel bzw. bei seitlichen Annäherungen ebenso weit über den Anfangs- und Endpunkt der gefährdeten Strecke hinausragen.

Ausserdem müssen an denjenigen Stellen, an welchen die Starkstromkabel unterhalb der Schwachstromkabel, letztere kreuzend, oder in einem

Sicherung privatrechtlicher Ansprüche nicht zu den Aufgaben der Polizeibehörden gehört. Das Interesse, welches die Polizeiverwaltung an dem Schutze von Telegraphen- und Fernsprechanlagen gegenüber elektrischen Starkstromanlagen haben kann, erledigt sich jedoch nicht durch das Vorhandensein oder das voraussichtliche Zustandekommen einer diesen Schutz bezweckenden privatrechtlichen „Vereinbarung“ zwischen dem Unternehmer der Starkstromanlage und der Telegraphenverwaltung. Denn soweit die Polizeibehörden für diesen Schutz zuständig sind, haben sie ihn von Amts wegen zu gewährleisten. Nach der Reichsgesetzgebung beschränkt sich der polizeiliche Schutz der Telegraphen- und Fernsprechanlagen gegenüber anderen elektrischen Anlagen aber auf den allgemeinen Schutz für Leben und Eigentum, also auf den Schutz für den Bestand (die Substanz) der Telegraphen- und Fernsprechanlagen und auf den Schutz für die Sicherheit (Leben und Gesundheit) des Bedienungspersonals, während der behördliche Schutz des Telegraphen- und Fernsprechbetriebes gegen „störende Beeinflussungen“ durch andere elektrische Anlagen den Gerichten vorbehalten ist. Wir beziehen uns dafür und bezüglich des Begriffes der „störenden Beeinflussungen“ auf unseren, die elektrischen Kleinbahnen betreffenden Erlass vom 9. Februar d. J.¹⁾

Wir bestimmen deshalb, dass die Polizeibehörden bei der Herstellung von Starkstromanlagen, durch deren Bau oder Betrieb der Bestand vorhandener Telegraphen- oder Fernsprechanlagen oder die Sicherheit des Bedienungspersonals gefährdet werden könnten, von Amts wegen von dem Unternehmer der Anlage die Vorlegung der zur polizeilichen Prüfung des Vorhabens erforderlichen Unterlagen (Plan, Erläuterungsbericht u. dergl.) zu verlangen, über diese die Telegraphenverwaltung zu hören und die zum Schutze der Telegraphen- und Fernsprechanlagen erforderlichen Vorkehrungen durch polizeiliche Verfügung förmlich festzusetzen haben. Dies gilt namentlich von Starkstromanlagen, die öffentliche Wege benutzen oder kreuzen sollen, die bereits von Telegraphen- oder Fernsprechanlagen benutzt oder gekreuzt werden. Die Erörterungen der Polizeibehörden mit der Telegraphenverwaltung und die dem Unternehmer der Starkstromanlage im Hinblick auf die Telegraphenanlagen zu machenden polizeilichen Auflagen haben sich grundsätzlich auf diejenigen Vorkehrungen zu beschränken, die den Bestand (die Substanz) der Telegraphen- oder Fernsprechanlagen, sowie Leben und Gesundheit des Bedienungspersonals zu schützen bestimmt sind. Welche Vorkehrungen hierfür im allgemeinen in Frage kommen, ergibt sich aus unserem oben erwähnten Erlass vom 9. Februar d. J., insonderheit aus Ziffer 1, 4, 5, 6, 7 und 8 der „Allgemeinen Anforderungen“ daselbst.²⁾ Ein polizei-

1) Siehe ETZ 1904, Heft 10, S. 192.

2) Der Erlass, betr. den Schutz der Telephon- und Fernsprechanlagen gegenüber elektrischen Kleinbahnen, ist zu finden ETZ 1904, S. 192. Die dort angezogenen Ziffern 1, 4, 5, 6, 7, 8, welche für Starkstromanlagen im allgemeinen in Betracht kommen, seien hier wiedergegeben:

1. Falls die Stromzuführung durch eine oberirdische blanke Leitung erfolgt, muss diese, die „Arbeitsleitung“, an allen Stellen, wo sie vorhandene oberirdische Telegraphen- oder Fernsprechlinien kreuzt, mit Schutzvorrichtungen versehen sein, durch welche eine Berührung der beiderseitigen Leitungen verhindert oder unschädlich gemacht wird. Solche Vorrichtungen können u. a. bestehen in geerdeten Schutzdrähten oder Fangnetzen, aufgesattelten Holzleisten u. dergl.

4. An oberirdischen Kreuzungen der beiderseitigen Anlagen muss der Abstand der untersten Telegraphen- oder Fernsprechleitung von den höchstgelegenen stromführenden

Telegraphenverwaltung vor der endgültigen Beschlussfassung der Polizeibehörde stets dem Unternehmer der Starkstromanlage zur Erklärung mitzuteilen. Zur Beschleunigung des Verfahrens empfiehlt sich, diese Erörterungen eventuell in kontradiktorischer Verhandlung mit den beiden Teilen zu erledigen. Die dem Unternehmer zu machenden Auflagen sind stets ohne jede Beziehung zu etwaigen zwischen ihm und der Telegraphenverwaltung getroffenen oder zu treffenden privatrechtlichen „Vereinbarungen“ festzusetzen, vollständig in die polizeiliche Verfügung aufzunehmen und als solche zu kennzeichnen, die der Unternehmer der Polizeibehörde gegenüber zu erfüllen hat. Demgemäss sind alle Auflagen zu unterlassen, die den Unternehmer beim Bau und Betriebe der Anlage in irgend einer Form von der Telegraphenverwaltung, insonderheit auch von deren Einvernehmen oder Zustimmung abhängig machen könnten. Das schliesst nicht aus, ihm in einzelnen Beziehungen, beispielsweise bezüglich geplanter Aufgrabungen oder Veränderungen oder Erweiterungen der Anlage u. dgl. eine vorgängige Anzeige an die Telegraphenverwaltung zur Pflicht zu machen. Die Bestimmungen unter Ziffer 9 und 10 der Anlage des Erlasses vom 9. Februar d. J. sind nach Bedarf entsprechend zu verwerten. Von der polizeilichen Verfügung an den Unternehmer der Starkstromanlage, durch welche ihm besondere Auflagen zum Schutze der Telegraphenanlagen gemacht oder von der Telegraphenverwaltung verlangte Auflagen abgelehnt werden, ist stets eine Abschrift der Telegraphenverwaltung mitzuteilen.

Es ist selbstverständlich, dass bei der polizeilichen Prüfung geplanter Starkstromanlagen nicht bloss der Schutz der Telegraphen- und Fernsprechleitungen, sondern aller elektrischen Leitungen und aller Interessen wahrzunehmen ist, die durch die Anlage gefährdet werden könnten. Durch diesen Erlass finden unsere Erlasse vom 16. März 1886 und vom 21. Juni 1898 ihre Erledigung.“

Verlegung der Leitungen in Innenräumen.

Allgemeines.

An anderer Stelle¹⁾ ist die Konstruktion der für die Installation in Innenräumen in Frage kommenden Leitungen bereits besprochen worden. Dem Installateur steht ein mannigfaltiges Material zur Verfügung, unter dem er je nach der Beschaffenheit der Örtlichkeit seine Auswahl treffen kann, und er wird hierbei sehr sorgfältig zu wählen haben, je nachdem der betr. Raum trocken, feucht, triefend nass, feuergefährlich u. s. w. ist. Ferner sind die Zwecke zu berücksichtigen, denen ein Raum dient; es werden verschiedene Leitungen zu wählen sein, je nachdem es sich um Wohnräume, Fabriken, Bergwerke, Schiffe u. dgl. handelt.

153.
An eine Installation zu stellende Anforderungen.

Nicht aber allein die Wahl des Leitungsmaterials, sondern auch die Art der Verlegung wird, diesen verschiedenen Umständen Rechnung tragend, verschieden sein müssen.

Der Einfluss der Spannung ist ebenso wichtig und erfordert ausser einem gut isolierenden Leitungsmaterial auch eine besonders sichere Verlegung, da von dieser die persönliche Sicherheit zu gewährleisten ist.²⁾

Es giebt nun sehr verschiedene Verlegungsmöglichkeiten, die näher zu besprechen der Zweck dieses Kapitels sein soll.

Die Anforderungen, die an eine Leitungsanlage zu stellen sind, sind die folgenden:

1. Ein genügend hoher Isolationswert,³⁾ der stets zu erhalten ist; es muss demnach möglich sein, die Leitungen dauernd zu kontrollieren und leicht auszuwechseln.
2. Feuersicherheit durch Wahl genügend grosser Querschnitte, entsprechende Anordnung der Leitungen u. s. w.
3. Persönliche Sicherheit durch ausreichenden Schutz gegen Berührung,²⁾ Erdung u. s. w.
4. Schönheitsrücksichten.
5. Möglichst geringe Kosten.

Nicht alle Punkte lassen sich in jeder Anlage berücksichtigen, oft müssen die für den Einzelfall weniger in Frage kommenden den wichtigeren gegenüber vernachlässigt werden.

1) Hdb. VI, 1, S. 156 f.

2) Näheres siehe Hdb. VI, 2: Persönliche Sicherheit.

3) Näheres siehe in diesem Hdb. VI, 2.

Die verlangte Zugänglichkeit¹⁾ der Leitungen verbietet ihre unmittelbare Verlegung in den Fussboden oder die Mauern. Sollen sie dem Auge entzogen sein, so müssen sie in Rohren oder Kanälen untergebracht werden, jedoch so, dass sie jederzeit wieder herausgezogen werden können. Für unterirdisch verlegte Kabel ist diese Verlegungsart nicht Bedingung, es muss nur dafür gesorgt werden, dass man zum Zwecke der Prüfung an ihre Endverschlüsse heran kann.

Sind in irgend einer Weise mechanische Verletzungen der Leitungen zu erwarten oder liegen sie im Handbereich, so müssen sie durch geeignete Verkleidungen geschützt werden. „Wo die Gefahr einer Verletzung vorliegt,“ sagt WEBER,²⁾ „kann nicht allgemein angegeben werden; es richtet sich dies nach der Beschaffenheit und Benutzungsart der Örtlichkeit. Diese Gefahr ist z. B. stets vorhanden, soweit die Leitungen in Betriebsstätten, an denen grössere Werkstücke und Werkzeuge gehandhabt werden, in Küchen, Kinderzimmern u. dgl. im Handbereiche liegen. Besonders gefährdet sind die Fussbodendurchgänge, ferner auch Leitungen, welche unmittelbar auf den Fussböden, z. B. auf dem eines Speichers geführt sind, wie dies z. B. bei den Zuleitungen und sogenannten Oberlichtern bei Bühnenbeleuchtungen oder zu Kronleuchtern vorkommt. Diese bedürfen eines Schutzes auch dann, wenn der Speicher in der Regel nicht betreten wird. Überhaupt ist das Verlegen auf der Oberkante oder Oberfläche von horizontal verlaufenden Konstruktionsteilen der Gebäude viel weniger zu empfehlen, als die Benutzung der unteren oder seitlichen Flächen zu diesem Zweck.“

Werden die Leitungen in Rohre verlegt, so sind sie durch diese geschützt; in der Regel werden solche Leitungen keines besonderen weiteren Schutzes bedürfen. An besonders gefährdeten Stellen, selbst wenn die Rohre in das Mauerwerk gebettet sind, wird man aber weitere schützende Massnahmen treffen müssen.

Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass alle üblichen Schutzvorrichtungen keinen absoluten mechanischen Schutz gewähren können; sie sollen unbeabsichtigte Beschädigungen ausschliessen, gegen rohe Gewalt können sie nicht schützen. Man soll daher nicht unbillige Schutzvorrichtungen verlangen, welche die Anlage zwecklos verteuern.

154.
Kreuzungen.

Wie bei allen Leitungsverlegungen sind auch hier Kreuzungen möglichst zu vermeiden. Wo sie aber nicht zu umgehen sind, ist durch Zwischenlegung von Isoliermaterial ein Schutz gegen die Berührung von Leitern verschiedenen Potentials und verschiedener Stromkreise zu schaffen. In der Regel wird dieser durch übergeschobene Hartgummirohre herbeigeführt, die gegen Verschieben dadurch gesichert werden, dass sie mit Isolierband am Leiter festgebunden werden, oder dadurch, dass unmittelbar vor und hinter das schützende Hartgummrohr eine Rolle gesetzt wird. Wesentlich besser und sicherer ist es jedoch, Kreuzungen dadurch vorzunehmen, dass man die Leitungen in einem sicheren Abstand frei aneinander vorbeiführt, und können, um diese Entfernung zwischen beiden Leitern festzulegen, die in Fig. 233 und 263 gezeichneten Rollen verwendet werden. Die eine Leitung wird an der unteren Nute festgebunden, während die zweite kreuzende an die obere Nute gelegt wird.

1) Nach § 26 a der Sicherheitsvorschriften.

2) Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften 6. Aufl., S. 108.

- 1 Ligroinlötlatpe mit Zubehör.
- 1 LötKolben 0.5 kg schwer, mit Stiel und Heft.
- 3 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 10, 13 und 17 mm Durchmesser, 250 mm lang.
- 1 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 20 mm Durchmesser, 300 mm lang.
- 1 Kabelmesser.

- 3 Nagelbohrer von 2, 4 und 6 mm Durchmesser.
- 1 Schutzbrille in Futteral.
- 1 Germania-Tourenzähler mit Glocke, in Etui.
- 1 Wasserwaage in gusseisernem Gehäuse mit Messingdecke, 250 mm lang, in Schutzkasten, für horizontale und vertikale Messungen.

Werkzeugkasten Grösse III (Fig. 235).

Gewicht etwa 121 kg. Masse $640 \times 425 \times 400$ mm.

Inhalt:

- 1 Flaschenzug, bestehend aus 2 eisernen Kloben mit je 3 nebeneinander liegenden Messingrollen von 50 mm Durchmesser, 2 Froschklemmen für Leitungen bis 35 mm² Querschnitt und 1 Hanfleine von 25 mm Länge und 8 mm Durchmesser.
- 2 Kettenfroschklemmen für Leitungen bis 120 mm² Querschnitt.
- 1 Schlägel 1.5 kg schwer, mit Stiel.
- 1 Bankhammer 1 kg schwer, mit Stiel.
- 1 Handhammer 0.5 kg schwer, mit Stiel.
- 1 Niethammer 0.15 kg schwer, mit Stiel.
- 1 Patenholzhammer mit Stiel.
- 2 Reserve-Einsätze für den Patenholzhammer.
- 4 LötKolben 1.5 kg, 1 kg, 0.5 kg und 0.25 kg schwer, mit Stiel und Heft.
- 3 Steinmeissel 300 mm, 400 mm und 500 mm lang.
- 1 Hartmeissel 250 mm lang.
- 1 Kreuzmeissel 200 mm lang.
- 2 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 26 mm Durchmesser, 400 mm und 500 mm lang.
- 2 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 20 mm Durchmesser, 300 mm und 500 mm lang.
- 3 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 10, 13 und 17 mm Durchmesser, 250 mm lang.
- 1 eiserne Brustleier von 130 mm Schwungweite.
- 8 Centrumborher von 7, 10, 13, 16, 20, 26, 30 und 34 mm Durchmesser.
- 8 amerikanische Schlangenborher von 7, 10, 13, 16, 20, 23, 26 und 30 mm Durchmesser.
- 14 amerikanische Spiralborher (Morseborher) für Metall je 2 Stück Type sch. 1, 14, 16, 21, 29; je 1 Stück Type sch. B, P, T, Y.
- 5 Nagelborher von 2 bis 6 mm Durchmesser.
- 6 Lattenborher von 7, 10, 13, 16, 20 und 26 mm Durchmesser.
- 6 Stubbs-Reibahlen Type sch. 46, 20, B, P, X, und 8", mit Heften.
- 1 Krauskopf von 16 mm Durchmesser, für Metall.
- 8 Schraubenzieher, je 2 von 4, 8, 10 und 16 mm Breite, mit Heften.
- 3 Schraubenzieher für Brustleier, von 6 u. 8, 10 u. 12, 14 u. 16 mm Breite.
- 3 Winkelschraubenzieher von 6 u. 8, 10 u. 12, 14 u. 16 mm Breite.
- 2 Kolumbus-Schraubenschlüssel von 210 und 260 mm Länge.
- 2 Schalttafel-Steckschlüssel für je 3 verschiedene Muttergrößen.
- 1 stählerner doppelseitiger Anschlagwinkel 310×200 mm.
- 1 Metallsägebogen mit zwei 260 mm langen Blättern.
- 1 Fuchsschwanzsäge von 360 mm Blattlänge.
- 1 Stichsäge, doppelzahnig, von 310 mm Blattlänge.
- 6 Flachzangen mit Seitenschneiden, je eine von 235 und 210 mm Länge, je zwei von 160 und 105 mm Länge.
- 6 Rundzangen, je zwei von 210, 160 und 105 mm Länge.
- 1 Brennerzange 235 mm lang.
- 1 Kneifzange 210 mm lang.
- 1 Durchschlag.
- 2 Körner, rund und dreikantig.
- 2 Kabelmesser.
- 4 Vorfeilen, je 250 mm lang, ohne Hefte, flach, rund, halbrund und dreikantig.
- 4 Schlichtfeilen, je 250 mm lang, ohne Hefte, flach, rund, halbrund und dreikantig.
- 3 Holzraspeln, je 250 mm lang, ohne Hefte, flach, rund und halbrund.
- 1 Sägenfeile 150 mm lang, ohne Heft.
- 6 Feilenhefte, 5 mittlere und 1 kleines.

- 1 Ligroinlötlampe mit Zubehör.
- 5 Stechbeutel 6, 10, 13, 20 und 26 mm breit, mit Heften.
- 1 Federzirkel 130 mm lang.
- 1 Federtaster 130 mm lang.
- 1 Borstenpinsel von 35 mm Durchmesser.
- 1 Stielbürste von 100×85 mm Bürstenfläche.
- 1 Fellenbürste von 110×50 mm Bürstenfläche.
- 1 eisernes Senklot 0·5 kg schwer, mit 10 m Hanfschnur.
- 2 Feilkloben von 130 und 180 mm Länge.
- 1 Bandmass 15 m lang, in Lederkapsel.
- 1 Wasserwaage in gusselernem Gehäuse mit Messingdecke, 250 mm lang, in Schutzkasten, für horizontale und vertikale Messungen.
- 5 Rohrbiegeeisen für Isolierrohre mit Messingüberzug von 9, 11, 16, 23 und 29 mm lichte Weite.
- 1 Wellendraht von 20 m Länge, zum Einziehen von Leitungen in Isolierrohre.
- 2 Setzeisen für Stahldübel.
- 2 Schraubenschlüssel für Stahldübel.
- 1 Handbohrmaschine für 2 Geschwindigkeiten, mit Brustbett und Centrierfutter bis 9 mm spannend.
- 1 Holzkasten enthaltend:
 - 1 Gaskluppe mit je 1 Paar Backen, je 1 Satz = 2 Stück Gewindebohrer (Vor- und Nachschneider), Windeisen und Stellstift, für Gewinde von $\frac{1}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " und $\frac{1}{2}$ ".

- 1 Holzkasten enthaltend:
 - 1 Whitworthkluppe mit je 1 Paar Backen, je 1 Satz = 3 Stück Gewindebohrer (Vor-, Mittel- und Nachschneider), je 1 Originalbohrer, 2 Windeisen und 1 Stellstift, für Gewinde von $\frac{1}{4}$ ", $\frac{5}{16}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{7}{16}$ " und $\frac{1}{2}$ ".
 - 5 Schneideisen und 5 Satz von je 2 Stück Gewindebohrer für 8 & H-Gewinde No. 25, 21, 18, 17, 14, in Kästchen.
 - 1 kleines Kugelwindeisen mit 4 Löchern.
 - 1 Bohrknarre 420 mm lang.
 - 1 verstellbarer Bohrwinkel aus Schmiedeisen, mit 2 Mutterbolzen.
 - 1 schmiedeeiserne Schraubzwinge von 200 mm Spannweite.
 - 8 Knarrenbohrer von 6, 8, 10, 13, 16, 20, 23 und 26 mm Durchmesser.
 - 1 stählerne Drahtlehre für Normalleitungen, in Lederfutteral.
 - 1 Ölspritzkanne mit Verschraubung.
 - 1 Washita-Ölstein von 50×155 mm Schleiffläche, in Schutzkasten.
 - 1 Germania-Tourenzähler mit Glocke, in Etui.
 - 1 Schutzbrille in Futteral.
 - 1 Sicherheitsgurt mit Fangleine, Karabinerhaken und Werkzeugtasche.
- In den Preis eingeschlossen, aber im Werkzeugkasten nicht verpackt ist:
- 1 Handtragekasten mit Schloss und 2 Schlüsseln.

Von besonderem Vorteil sind ferner bei grösseren Montagen Lochstanzen für Kupferschienen, Kupferschienen-Biegemaschinen und wo viele Löcher in Eisenkonstruktionen zu bohren sind Duplex-Lochstanzen und elektrisch angetriebene Handbohrmaschinen. Besonders bei der Montage von Schiffen, Werften u. dgl. sind die letzteren kaum zu entbehren. Es werden ferner viele Leitern verwendet, deren Konstruktion und Beschaffenheit grösste Aufmerksamkeit zu schenken ist. Die Holme müssen astfrei, die Beschläge sicher und in gutem Zustand sein. Bei Montagen, wo viel geklettert werden muss, sollen Sicherheitsgürtel, in Hochspannungsanlagen Gummihandschuhe und Gummischuhe nie fehlen.

Für die Werkzeugverwaltung ist es wichtig, dem Monteur stets ein genaues Verzeichnis des ihm übergebenen Werkzeuges, über welches er zu quittieren hat, auszuhändigen, damit er es stets kontrollieren kann. Am besten eignen sich doppelt geführte Werkzeughbücher. Die Hauptsache ist, dass der Arbeiter für fehlendes Werkzeug stets aufkommen muss, abgenutztes muss zurückgegeben und kostenlos durch neues ersetzt werden.

Nichts verursacht grössere Kosten bei der Anlage einer elektrischen Anlage wie die Maurerarbeiten. Diese lassen sich aber meistens nicht abschätzen, so dass es für jede Installationsfirma am besten ist, diese Arbeiten im Kostenanschlag von vornherein auszuschliessen. Es ist vorgekommen,

Schmutz verursacht wird, da bei sorgfältiger Arbeit kein Bohrmehl herunterfällt. Um es überhaupt zu verhüten, kann ein kleiner Behälter unterhalb der Bohrstelle angebracht werden, in welchen alle Staubteile fallen.

Die an anderer Stelle beschriebenen Porzellanrollen werden mit Holz- oder Eisenschrauben direkt an die Wand oder in besondere Holzdübel geschraubt, welche rund oder viereckig, stets aber konisch sind und in die Wand eingegipst oder einzementiert werden. Holzdübel dürfen nur für ausgetrocknete Wände verwendet werden und müssen aus hartem Holz, möglichst Buchen- oder Eichenholz, bestehen. Dieselben werden mit der grösseren Fläche zuerst in die Mauer eingesetzt und der freie Raum wird mit Gips ausgefüllt. Es ist gut, diese Dübel einige Millimeter bis unter die Ebene der Wandfläche einzudrücken, damit durch Anziehen der Schraube der Holzpflöck wieder festgezogen werden kann, falls sich derselbe später einmal lockern sollte.

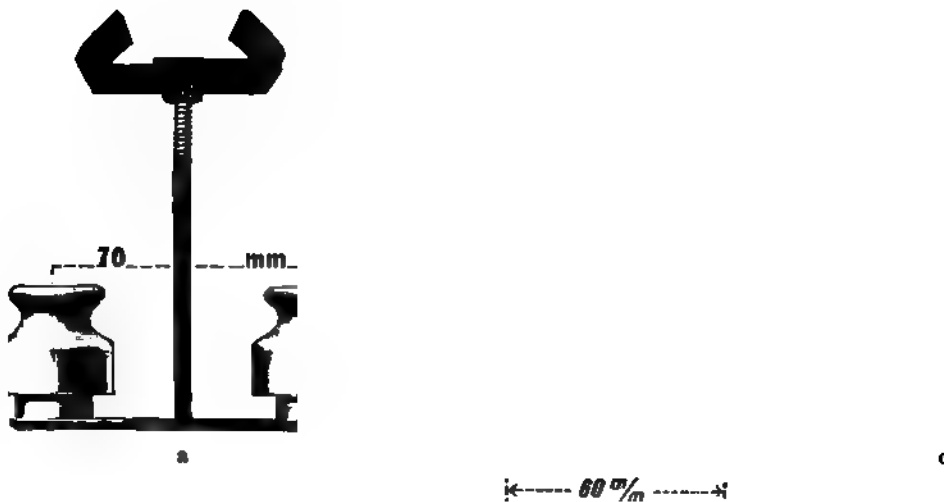
Es ist nun vielfach der Versuch gemacht worden, Holzdübel zu konstruieren, bei welchen man das Eingipsen ersparen kann. Sie laufen alle

a. b. c.
Fig. 237.

mehr oder weniger darauf hinaus, dass ein in ein zylindrisches oder nach hinten nur wenig konisches Loch eingesetzter Holzdübel durch einen Keil an dem in der Wand sitzenden Ende auseinander getrieben wird. Fig. 237 zeigt vier derartige Dübel. Bei der Konstruktion nach Fig. 237a wird in eine zylindrische Bohrung eine Holzschraube eingeführt. Die Bohrung verjüngt sich im hinteren Teil, so dass an dieser Stelle die Holzschraube den Dübel auseinander treibt. Die Dübel nach Fig. 237b werden dadurch befestigt, dass von vorn ein Keil eingetrieben wird, wobei allerdings der Dübel auseinander geht, das Bohrloch aber ausfüllt. Um dies zu vermeiden und den Dübel zusammen zu halten, wird von anderen Fabrikanten am vorderen Ende ein kleiner Eisenring aufgesetzt (Fig. 237c). Schliesslich zeigt Fig. 237d noch einen Holzdübel, bei welchem der Keil hinten eingesetzt und durch Hammerschläge auf das vordere, aus der Wand herausragende Ende eingetrieben wird.

Für das an anderer Stelle beschriebene System der Leitungsverlegung nach PESCHEL ist ursprünglich eine besondere Art der Befestigung mit Holzdübeln, aber ohne Eingipsen derselben, üblich gewesen. Es wurde mit Hilfe eines Stahldorns (Fig. 238) in die Wand ein Loch geschlagen, indem der Dorn bis zum Griff eingetrieben wurde. Der Dorn wird dann etwas gedreht,

In Fig. 242 sind besondere Rollenträger gekennzeichnet, welche verwendet werden, wenn die Leitungen in einem gewissen Abstand von der Decke geführt werden müssen. Eine andere Form haben KOTTGEN & Co. derartigen Rollenträgern gegeben; sie sind in Fig. 243 wiedergegeben.



b
Fig. 243.

Von Dübeln für einzelne Rollen und Schrauben seien noch die folgenden beschrieben: BÖDDINGHAUS-Spiraldübel, welche in Fig. 244 dargestellt sind; sie werden dadurch hergestellt, dass ein verzinkter Draht über das Gewinde

Verwendung besten Materials geneigt, sich umzubiegen, so dass aus diesem Grunde wohl 10 bis 20 % der verwendeten Dübel verloren gingen. PESCHEL versah die Dübel daher mit einer Scherfläche, welche den Übelstand behob.



Fig. 250.

Fig. 249.

Fig. 251.

Die Stahldübel werden mit angeschmiedeter Angel, welche mit Gewinde und einer Mutter versehen wird (Fig. 249), oder auch mit Innengewinde für die Aufnahme einer besonderen Schraube hergestellt.

Ausser den vorerwähnten sind noch mit mehr oder weniger Erfolg einschlagbare Dübel hergestellt worden, die teils nur eine andere Form, dreikantig, fischförmig, spiralförmig oder dgl. erhielten, teils auch aus Rohr mit eingesetztem Holzkern bestanden, welcher letztere bestimmt ist, eine Schraube aufzunehmen.

Von SCHUCKERT & Co. wurde für die Befestigung von Rollen ein Stahlnagel benutzt (Fig. 250), dessen Schaft vierkantig ist und in eine 20 mm lange, meisselförmige Schneide ausläuft. Die Isolierknöpfe oder Rohrschellen werden an dem in Form einer kreisförmigen Platte ausgebildeten Kopfe mittels einer Schraube befestigt. Da drei Schraubenlöcher vorhanden sind, so ist auch bei etwaigem Verziehen des Nagels eine solche Befestigung der Schraube möglich, welche die geradlinige Führung der Leitung nicht beeinträchtigt.

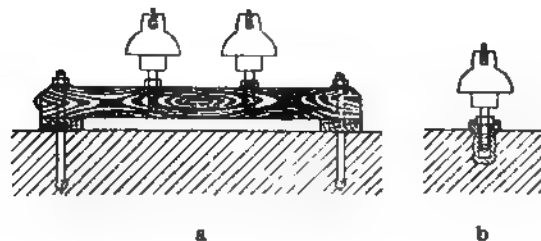


Fig. 252.

der Rohre nicht eintreten kann. Münden die Einführungen ins Freie oder in einen betriebsmässig feuchten Raum, so werden sie an dieser Seite trichterförmig ausgebildet. Wenn es sich um höhere Spannungen handelt werden diese Trichter nach Art der Isolierglocken mit mehreren Mänteln (Fig. 255) ausgerüstet.

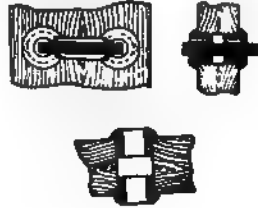


Fig. 254.

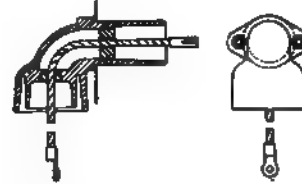


Fig. 255.

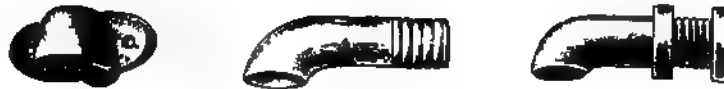


Fig. 256.

Verschlussblech
für WDF X

a



RT

Wanddurchführung
für Zwischenwände

b



c

Wanddurchführung
für Aussenwände

Fig. 257.

159.
Wand-
durch-
führungen
der
Siemens-
Schuckert
Werke.

Die einfachsten Formen zeigt Fig. 256, während in Fig. 255 eine Wanddurchführung für Eisenwände und für Spannungen bis 10000 Volt dargestellt wird. Um die durchführende Leitung möglichst in der Mitte des Rohres zu halten, sind zwei besondere Führungsstücke eingesetzt.

Die SIEMENS-SCHUCKERT Werke haben als Wanddurchführung für Spannungen bis 1000 Volt Konstruktionen eingeführt, welche in Fig. 257 erläutert werden. Sie bestehen aus Abschlussblechen a, welche entsprechend dem

spannungen wird daher die Einführung auf folgende Art ausgebildet. Die Öffnung im Mauerwerk wird besonders gross gewählt und die Leitungen in der Mitte frei durchgespannt. Eine besondere Auskleidung der Öffnung mit Isoliermaterial findet nicht statt. Dagegen wird sie an beiden Seiten mit Glastafeln abgeschlossen, in welchen für die Leitungen mit geringem Spielraum passende Löcher vorgesehen sind, eventuell bestehen die Platten auch aus zwei Teilen.

Hierdurch werden die Leitungen in der Mitte der Öffnungen gehalten und diese gegen das Eindringen von Vögeln, Insekten und Staub geschützt.

161.
Decken-
durch-
führungen.

Deckendurchführungen sind so auszugestalten, dass die Leitungen gegen mechanische Beschädigungen geschützt sind.

Führen Niederspannungsleitungen von einer Etage zur andern, so werden Eisenrohre verwendet, die mit Isoliermaterial ausgekleidet sein müssen, wenn es sich um Gummibandleitungen handelt, bei der Verwendung von Gummiaederleitungen der Auskleidung aber entbehren können. Da die im Handbereich liegenden Leitungen sowieso geschützt werden müssen, so sind diese

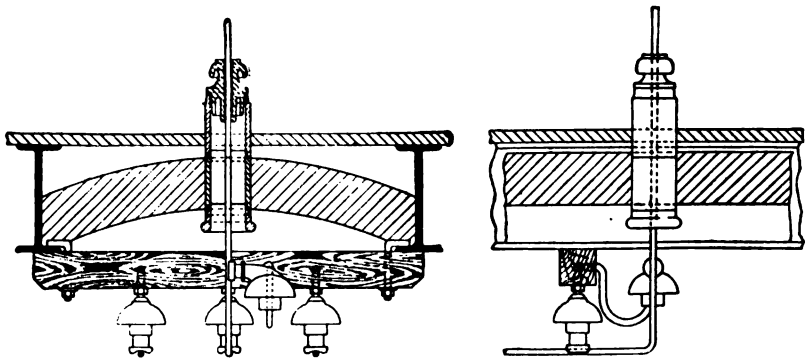


Fig. 259.

von unten durch die Decke kommenden Rohre zweckmässig bis mindestens 2 m über den Fussboden zu führen.

Es kann jedoch auch, z. B. wenn man die Leitungen auf Rollen verlegt, diese Verlegungsart durchgeführt werden, wobei die Leitungen durch einen offenen Spalt laufen. Zum Schutz werden sie dann mit Holz verschalt; jedoch sind die Verkleidungen so anzuordnen, dass sie jederzeit entfernt werden können, um den angesammelten Schmutz, der sich erfahrungsmässig sehr reichlich hinter derartigen Schutzverkleidungen festsetzt, entfernen zu können.

Für Hochspannungsleitungen werden Deckendurchführungen selten gebraucht; wo sie jedoch vorkommen, werden sie in ähnlicher Weise wie Wanddurchführungen ausgeführt. Eine besonders sichere Anwendungsart, wie sie von den SIEMENS-SCHÜCKERT Werken ausgeführt wird, zeigt Fig. 259, bei der unter Verwendung besonders konstruierter Krückenisolatoren der Übergang von der horizontalen zur vertikalen Leitung vermittelt wird.

162.
Gasdichte
Wand-
durch-
führungen.

Besondere Wanddurchführungen sind zu verwenden, wenn nicht nur die Leitungen sicher durch Wände geleitet werden sollen, sondern auch ein gasdichter, eventuell auch wasserdichter Abschluss erreicht werden muss. Der erstere Fall kommt am häufigsten bei den nach Akkumulatorenräumen führenden Leitungen, der zweite bei Schiffsinstallationen vor.

164.
Rollen für
Spannungen
bis 500 Volt.

Alle möglichen Konstruktionen, welche als Rollen, Ringe und Klemmen auf den Markt gebracht wurden, suchten dem allgemeinen Bedürfnis abzuhelfen, es würde jedoch zu weit führen, dieselben hier alle zu besprechen, wir beschränken uns daher auf die neueren und zur Zeit üblichen Anordnungen.

Es werden fast ausschliesslich Isolierstücke verwendet, welche aus Porzellan bestehen, dessen Oberfläche glasiert ist. Ab und zu wird Glas verwendet, welches jedoch zu leicht bricht, so dass der Vorteil der Billigkeit bei weitem aufgehoben wird.

In allererster Linie bilden die in den Fig. 261 a und b wiedergegebenen Rollen, die zu Millionen verwendet werden, ein einwandfreies Mittel zur Verlegung der Leitungen. Sie gewähren eine grosse Übersicht über die verlegten Leitungen, gestatten eine schnelle und billige Montage und gewährleisten in normal trockenen Räumen eine gute Isolation des Leitungsnetzes. In der in Fig. 261 a und b gezeigten Form sind sie zulässig bis zu Spannungen von 500 Volt, und zwar können auf ihnen bis 250 Volt Gummibandleitungen, über 250 Volt Gummiaderleitungen verlegt werden. Die Konstruktion dieser Isolierkörper ist nun so getroffen, dass die Leitungen in einem für trockene Räume genügenden Abstand von der Wand gehalten werden. Für Spannungen bis 500 Volt genügen 10 mm und für Spannungen von 500 bis 1000 Volt 2 cm. Die Abmessungen dieser Rollen, wie sie bei den SIEMENS-SCHUCKERT Werken üblich, ist aus Tabelle No. 10 ersichtlich.

Tabelle No. 10.

Type	Grösster zulässiger Leistungsquerschnitt mm ²	Höhe	Grösster Durchmesser	Zu verwendende Holzschraube	
				Länge mit Kopf	Schaftstärke mm
Rollen nach Fig. 248 a mit Fuss					
F	2.5	14	16	30	4.25
F I	10	21	24	40	4.6
F II	35	28	32	50	5.55
F III	70	35	40	65	6.75
F IV	95	42	48	80	7.0
Rollen nach Fig. 248 b ohne Fuss					
R	1	10	14	20	4.25
R I	6	15	21	30	4.25
R II	16	20	28	40	4.6
R III	35	25	35	55	6.75
R IV	70	30	42	65	6.75

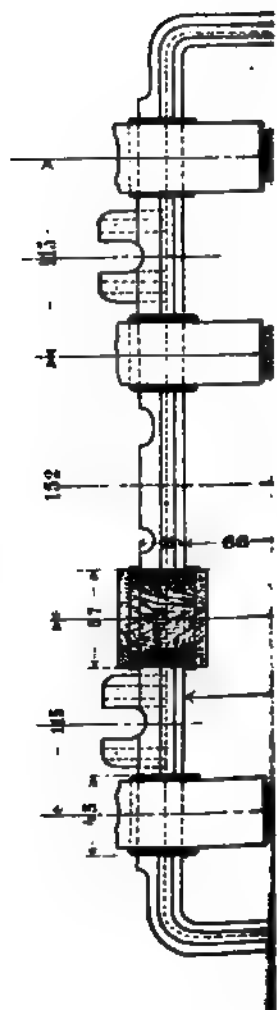
Die kleinsten Typen der vorerwähnten Rollen werden meistens nur zur Befestigung von Spannungsleitungen hinter Schalttafeln verwendet.

Isolierkörper für zwei oder drei Leitungen vertreiben die SIEMENS-SCHUCKERT Werke unter der Bezeichnung Nutenrollen. Sie besitzen mehrere Nuten, und zwar werden die Leitungen abwechselnd auf beiden Seiten des Körpers verlegt, auch gern zu Kreuzungen verwendet (Fig. 263).

Werden die Leitungen um Mauervorsprünge oder Träger herumgezogen, so legt man zwischen die vorstehenden Kanten Eckrollen, über welche die

Dr
 20
 1.

18
-
12-
.



Method 2: Elektrostech

Re
Spe
ble

Leiter straff verlegt werden können,¹⁾ ohne dass die Mauer berührt wird. Der festgespannte Draht hält die Eckrollen von selbst in ihrer Lage.

Rollen sind auch für höhere Spannungen zulässig, wenn die diesen Spannungen entsprechenden Leitungsmaterialien verwendet und ein grösserer Abstand von der Wand gewahrt bleibt. Diese Entfernungen ergeben sich aus Tabelle No. 11.

165.
Rollen für
Spannungen
über
500 Volt.

Tabelle No. 11.

Spannung in Volt	Abstand der Leitungen von der Wand in cm
bis 500	1
„ 1000	2
über 1000 bis 5000	5
„ 6000	6
„ 7000	7
„ 8000	8
„ 9000	9
„ 10000	10

a

Fig. 261.

b

Fig. 263.

Für Spannungen über 1000 Volt müssen die früher erwähnten Spezialgummiaderleitungen²⁾ verwendet werden.

Für alle Rollen, gleichviel welche Leitungen auf ihnen verlegt werden und für welche Spannungen sie bestimmt sind, darf die Entfernung für die Befestigungsstellen nicht grösser als 80 cm sein; nur in dem Fall, dass die Befestigung der Rollen an Decken und Dachkonstruktionen erfolgt, kann sie etwas grösser gewählt werden, wenn die Innehaltung der Entfernung von 80 cm Schwierigkeiten bereiten sollte und die Gebäudekonstruktion eine bequeme Befestigung an Trägern, Balken u. dgl. in etwas grösserer Entfernung gestatten. Hierbei sollte jedoch auch eine gewisse Grenze nicht überschritten werden. Wenn die Anbringung der Befestigungsstellen aber nur in Entfernungen von über 1.5 m möglich ist, verwende man keine Rollen mehr, sondern Isolatoren.

166.
Entfernung
der Be-
festigungs-
stellen.

Während für Spannungen bis 500 Volt die Isolierrollen in der vorher beschriebenen einfachen Form ausreichen, macht die Verwendung höherer Spannungen, trotz Benutzung besser isolierter Leitungen, andere Rollenkonstruktionen notwendig, da bei jenen Tropfwasser, welches sich an den Wänden bildet, über den Fuss der Rolle zu den Leitungen gelangen und

1) Siehe ETZ 1902, S. 1153.

2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 167.

infolgedessen eine leitende Brücke zur Erde gebildet werden kann. Bei den Rollen Fig. 261 b, welche einen runden Fuss haben, liegen die Verhältnisse etwas günstiger als beim geraden Fuss (Fig. 261 a), da bei jenen häufig die Feuchtigkeit vorbeisickern wird. PESCHEL konstruierte deshalb Rollen, welche eine Anzahl von Rillen aufweisen, durch welche der Weg von der Wand zur Leitung vergrössert wird und etwa auftretendes Tropfwasser weit weniger leicht zur Leitung gelangen kann. Die Rollen werden in zwei verschiedenen Mustern ausgeführt, die eine für Befestigung mit durchgehender Schraube (Fig. 264), die andere zur Befestigung mittels eingekitteten Bolzens. Bei der ersteren Konstruktion sind, um den Weg von der Leitung zur Schraube und von da zur Erde zu vergrössern, auch am Kopf Rillen angebracht. In Fällen, wo ein Rosten der Befestigungsschraube erwartet werden kann, sollte die obere Öffnung nach der Befestigung mit Glaserkitt geschlossen werden.

Von demselben Prinzip wie HARTMANN & BRAUN ausgehend, hat H. RENTSCH in Meissen eine Isolierrolle konstruiert (Fig. 265), bei welcher das Schwitz-

Fig. 264.

Fig. 265.

wasser durch Kanäle im Innern der Rolle geleitet und nach aussen abgeführt wird. Ob sich diese Konstruktion indessen in der Praxis bewähren wird, ist noch nicht entschieden; es wird abzuwarten sein, ob dieselbe stabil genug ist, um den beim Spannen der Leitung auftretenden Zug auszuhalten. Zudem besteht dieselbe aus zwei Teilen, wodurch dieselbe keineswegs an Festigkeit gewinnt und weniger bequem ist.

167.
Das Fest-
binden der
Leitungen
an Rollen.

Auf den Rollen werden die Leitungen mit Hilfe von metallnem Bindedraht festgebunden, jedoch ist es erforderlich, die Leitungen an den Befestigungsstellen mit Isolierband zu umwickeln, damit der Draht die Isolierung nicht zerschneidet. Nur wenn Mehrfachleitungen verlegt werden, ist die Verwendung metallener Bindedrähte verboten, da bei diesen Kurzschluss entsteht, wenn der Bindedraht zu straff angezogen und infolgedessen die Isolierung durchschnitten wird, oder wenn sich im Laufe der Zeit die Isolierung durchscheuern sollte. Es werden daher in diesem Fall Fäden aus Baumwolle, Jute oder Garn verwendet. Auch wenn Einwirkungen chemischer Natur zu erwarten stehen, hat sich häufig geteerte Hanfschnur wesentlich besser gehalten als metallener Bindedraht.

Das Anbinden der Leitungen an Rollen erfolgt, indem man den Bindedraht von entsprechender Länge mit der Mitte an die Rolle legt, die beiden Enden unter der Leitung durchführt (Fig. 266 i), über dem Draht kreuzt, sie auf der andern Seite der Rolle zusammenführt und mit der Hand oder einer

allerweiteste Verbreitung gefunden. Es wird neuerdings dadurch etwas einfacher gestaltet, dass statt der kleinen Mutter eine mit Gewinde versehene Metallrosette verwendet wird. Gleichzeitig aber ist auch die Rolle selbst geändert (Reformrolle von HARTMANN & BRAUN, Fig. 273 a); sie besteht nunmehr aus einem Fussstück mit zentral aufgesetztem Zapfen, auf den jetzt ein offener Ring aufgeschoben wird, der seinerseits durch die vorher erwähnte Metallrosette abgeschlossen wird. Der Vorteil dieser Reformrolle besteht darin, dass die Doppelschnüre nur so weit aufgedreht werden müssen, als erforderlich ist, um sie über den verhältnismässig schwachen Zapfen überzuschieben.

Bei der in Fig. 273 b dargestellten Art wird keine Metallkappe, sondern eine Mutter A verwendet, die in den oberen Teil eingekittet ist. Fig. 273 c besteht aus einer einfachen Rolle mit einer Aussparung nach unten, in welche eine Mutter A gleichfalls eingekittet wird.

169.
Isolatoren
in bedeckten
Räumen.

Wir haben es nun innerhalb der Gebäude nicht immer mit trockenen Räumen zu thun. In Kellerräumen, Waschküchen, ganz abgesehen von vielen in industriellen Betrieben gelegenen Räumen, herrscht oft eine recht grosse Feuchtigkeit. Hier ist die Verlegung der Leitungen auf Rollen unmöglich, da der Draht stets feucht gehalten werden würde und Isolationsfehler die Folge wären. Je nach den Verhältnissen bieten schon die in Fig. 264 wiedergegebenen Rollen ein annehmbares Verlegungsmittel, ist jedoch starke Nässe vorhanden, so genügen auch diese nicht mehr und an ihre Stelle müssen Isolatoren treten. Da für diese grössere Spannweiten gewählt werden, so ist auch die Anzahl der Befestigungsstellen und somit auch die Anzahl der dem Strom gebotenen Ausweichungsstellen geringer. Sind die Räume hoch, so können bis 250 Volt gegen Erde blanke Leitungen auf ihnen verlegt werden, sie müssen jedoch,¹⁾ soweit sie nicht unausschaltbare Parallelzweige sind,

bei Spannweiten von mehr als 6 m mindestens 20 cm,

„ „ „ 4 bis 6 „ „ 15 „

„ kleineren Spannweiten „ 10 „

voneinander, in allen Fällen aber mindestens 10 cm von der Wand bezw. von Gebäudeteilen entfernt sein.

Sind dagegen die Räume zu niedrig oder ist die Spannung höher als 250 Volt, so werden Leitungen mit Gummiumpressung verwendet.

Es war nun früher allgemein üblich, in solchen Fällen den Glockenisolator (Fig. 160) anzuwenden, dessen Befestigung jedoch sehr häufig infolge örtlicher Verhältnisse Schwierigkeiten bot.

Solange die Leitungen an der Wand entlang geführt werden, finden gebogene Stützen Verwendung, die weite Ausladung kann gut in Kauf genommen werden. Wenn die Leitungen jedoch an der Decke zu führen sind, ragen die erforderlichen Eisenkonstruktionen zu weit in den Raum herein und wirken bei ungünstigen räumlichen Verhältnissen sehr störend.

BÜTTNER konstruierte, den Nachteil der Glockenisolatoren für diesen Zweck erkennend, einen Isolator, bei welchem er einen Mantel in geringer Entfernung um einen zylindrischen Kern legte (Mantelrolle) und der den Zweck hat, als Abtropfkante zu dienen. Diese Konstruktion wurde von

1) § 28b) der Sicherheitsvorschriften für Niederspannung.

so werden statt dieser Einrichtung Kabel längs der Kranbahn verlegt, in die in gewissen Zwischenräumen Anschlussdosen (Fig. 132—134, Hdb. VI, 1) eingeschaltet werden, von denen mit Hilfe von Steckern und beweglichen Leitern, die am Kran selbst auf eine Kabeltrommel aufgewickelt sind, die Überleitung des Stromes vom Kabel zum Kran stattfindet.¹⁾ Beim Verfahren, welches sich in diesem Falle immer nur auf kurze Längen zu erstrecken pflegt, werden die Leitungen von der Trommel langsam abgewickelt. Die Länge dieser beweglichen Leitungen ist so zu bemessen, dass sie bequem nach zwei benachbarten Anschlussdosen langt, wenn der Kran in der Mitte zwischen beiden steht.

Fig. 276 zeigt zwei derartige Konstruktionen der A. E.-G., und zwar ist die erstere mit Schleifringen und Bürsten versehen. Die Anschlusskabel sind mit den Bürsten fest verbunden. Bei der zweiten Anordnung fehlen die Schleifringe, die Anschlussleitungen müssen daher beiderseits mit Steckern ausgerüstet sein.

Die Schleifleitungen bestehen stets aus hartgezogenen Kupferdrähten und werden in Durchmessern von 6—8 mm verwendet. Sie werden zwischen zwei gegen Erde isolierten Endbefestigungen (Fig. 276 d), welche mit Drahtspannern ausgerüstet sind, befestigt und längs ihres Weges in Entfernungen von 5—8 m durch besondere Isolatoren unterstützt. Wird die Kranbahn länger als etwa 100 m, so genügen die beiden Endbefestigungen nicht, um den verhältnismässig grossen Zug aufzunehmen, und man pflegt dann in der Mitte dieser Leitung noch einen besonderen Stützpunkt zu schaffen, der den Zug aufnimmt, aber so ausgebildet sein muss, dass die Stromabnahme in der gleichen Weise wie auf der übrigen Strecke ermöglicht ist. Reisst eine Kranleitung, so ist es in den meisten Fällen wichtig, sie so schnell wie möglich wieder in Stand zu setzen. In zuverlässiger Weise kann eine Lötung stattfinden in der Art, dass die Leitungen, wie Fig. 276 b zeigt, abgesetzt und mit Silberlot verlötet werden. Da aber diese durch die Lötung ausgeglühte Stelle nicht mehr die gleiche Festigkeit haben kann wie die unversehrte hartgezogene Leitung, so ist es vorteilhaft, an der betreffenden Stelle eine der in Fig. 277 f gezeigten Befestigungen anzuordnen. Ein zweiter Riss wird selten an der Lötstelle selbst, vorausgesetzt, dass sie gut ausgeführt ist, auftreten, höchstens in ihrer unmittelbaren Nähe.

Am Kran selbst, wo vom Standpunkt des Führers viele Leitungen nach den Motoren gehen, ist eine grössere Anzahl von Schleifleitungen erforderlich, die aber auch zum Nachspannen eingerichtet werden, etwa wie es Fig. 276 c nach den Ausführungen der A. E.-G. zeigt.

Die Anordnung der Schleifleitungen selbst muss so erfolgen, dass eine bequeme Stromabnahme erfolgen kann. In der Regel bildet ein federndes Glied die Verbindung, damit geringe Senkungen des Geleises u. s. w. die Stromzuführung nicht aufheben. Die Stromabnehmer müssen so gestaltet sein, dass sie an jeder Stelle die Arbeitsleitung berühren. Infolgedessen sind nicht alle Stromabnehmer bei jeder Art der Befestigung der Schleifleitung zu verwenden, sie müssen genau zusammen passen.

In welcher Art dies geschieht, zeigt die Fig. 277. Die Kontakte Fig. 277 a sind nur zur Stromabnahme von nicht unterstützten Schleifleitungen bestimmt; es kann sich daher nur um kurze Strecken handeln. Fig. 277 b

1) Diese Anordnung ist z. B. in den Hafenanlagen in Düsseldorf und Königsberg üblich.

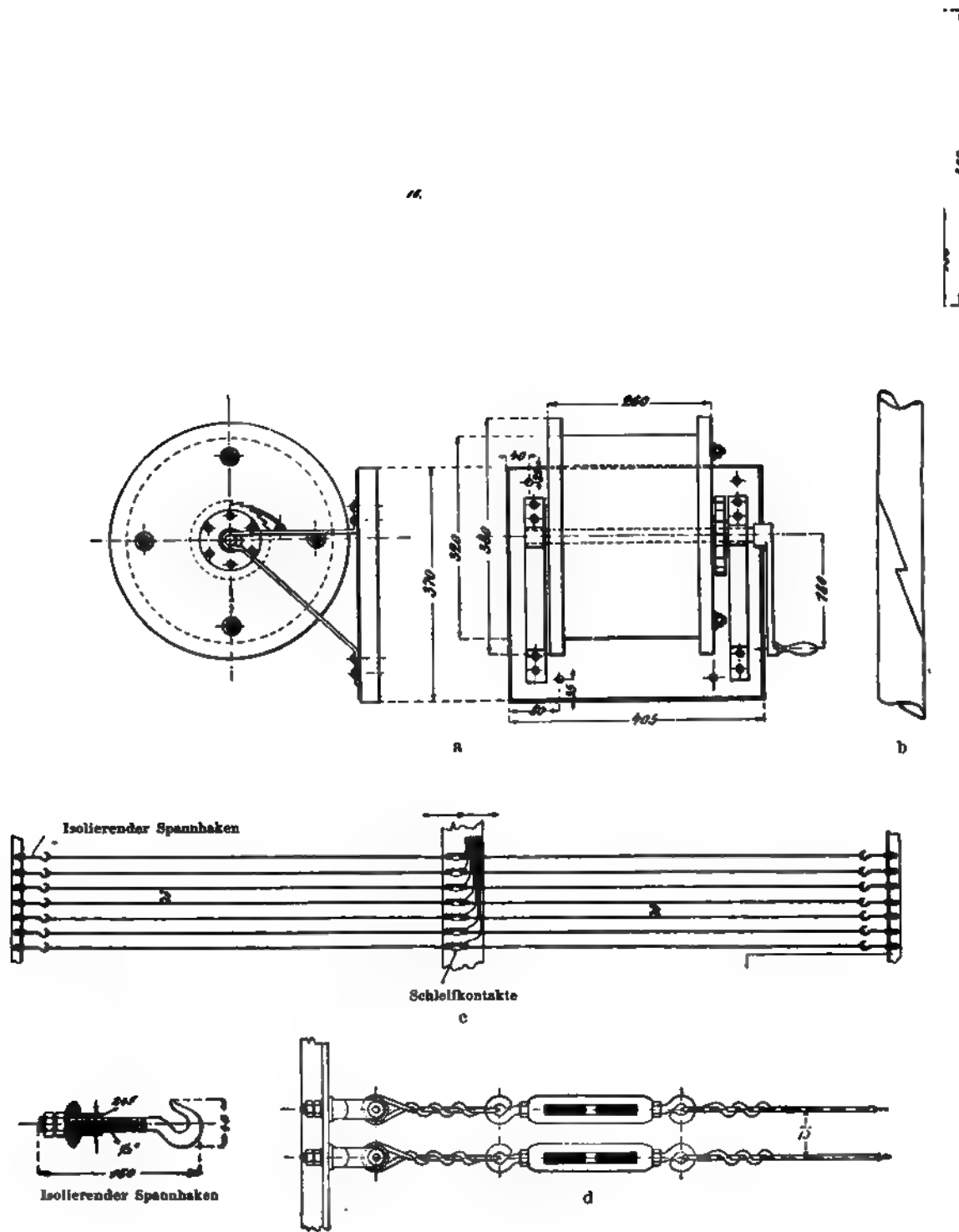


Fig. 276.

172.
Allgemeines
über Rohr-
verlegung.

An Stelle der Verlegung der Leitungen in Holzleisten trat die in Rohre, die aus isolierenden Stoffen, aus Metall oder aus Metall mit isolierender Auskleidung bestehen; sie werden sowohl auf der Wand als unter dem Verputz verlegt. Die Rohrsysteme haben den Zweck, Leitungswege zu schaffen, in denen die Leitungen gegen mechanische oder chemische Einflüsse geschützt sind und in welche sie ein- und ausgezogen werden können, ohne besondere bauliche Veränderungen vornehmen zu müssen. Bei einigen Rohrsystemen gilt als Grundsatz, Eindringen von Wasser in die Rohre möglichst zu vermeiden, während bei anderen hierauf kein Wert gelegt wird, vielmehr durch die Wahl des Leitungsmaterials den schädlichen Einflüssen der Feuchtigkeit die Spitze geboten wird. Allgemein gilt für die Rohrverlegung, dass alle Rohre so weit gewählt werden, dass es möglich ist, die Leitung ohne Anwendung von Gewalt einzuziehen und auszuwechseln. Um dies zu erreichen, ist es erforderlich, die Rohrsysteme vollständig fertig herzustellen, ehe mit dem Einziehen der Leitungen begonnen wird. Die hier und da früher angewendete Montageart, die Leitungen vor Verlegung der Rohre in dieselben einzuziehen, ist durchaus verwerflich, da hauptsächlich an den Krümmungsstellen die Leitungen so fest eingeklemmt werden, dass es nicht möglich ist, sie später wieder zu entfernen, ohne die Rohrstrecken zu verletzen. Aus dem gleichen Grunde ist auch erforderlich, nicht zu enge Rohre zu wählen, und zeigt Tabelle No. 12, wieviel Leitungen von einem bestimmten Durchmesser in die üblichen Rohre eingezogen werden können.

Tabelle No. 12.

Lichte Weite der üblichen Rohre	Grösster zulässiger äußerer Durchmesser der Leitungen bei der Verlegung			
	eines	zweiter	dreier	vierer
	Drähte in ein Rohr			
7	4	—	—	—
9	5	—	—	—
11	6·5	4·5	4	3
13·5	8·5	5	4·5	4
16	11	6·5	5	4·5
23	16	9·5	7	6
29	17·5	12·5	11	8·5
36	23	16	12·5	10
48	32	18	16	12·5

173.
Anzahl und
Querschnitt
der in einem
Rohr zu-
lässigen
Leiter.

Alle Isolierrohre werden in den bereits in der vorigen Tabelle angegebenen Dimensionen hergestellt, jedoch sind die Rohre für 7 mm lichte Weite für Starkstromleitungen nicht zu verwenden, da ihr Durchmesser nicht ausreicht, um gut isolierte Drähte ohne Schwierigkeiten einzuziehen. In das Rohr von 9 mm lichte Weite kann höchstens eine Leitung eingezogen werden; sollen zwei Leitungen in ein Rohr verlegt werden, so muss die lichte Weite mindestens 11 mm betragen.

Ein alter Grundsatz für den Installateur ist der, nie Leiter verschiedener Stromkreise in ein und dasselbe Rohr zu verlegen, da im Fall eines Fehlers in einem Stromkreis auch andere, an jenem Fehler an und für sich unbeteiligte Leitungen in Mitleidenschaft gezogen werden könnten.

Die Anzahl der in einem Rohr ohne Eisenmantel zulässigen Leitungen ist für Gleich- und Wechselstrom auf höchstens drei bemessen, deren Querschnitt aber 6 mm² für jeden Draht nicht überschreiten darf. Sollen Drähte

Fig. 293 e zeigt eine viereckige Rohrdose, in welche von unten zwei, rechts und links je ein Rohr von je 9 mm lichter Weite eingeführt sind; die Verschlussplatten sind mit entsprechenden Bohrungen versehen, die obere Aussparung ist durch eine Platte ohne Bohrung abgeschlossen. Der Boden des Sockels enthält eine runde Öffnung, die durch eine Deckplatte, welche entfernt werden kann, verschlossen ist; es kann dann ebenfalls ein Rohr von maximal 11 mm lichter Weite eingeführt werden, so dass diese Dose auch bei Wanddurchführungen zu benutzen ist. Ebenso wie die runde kann auch die viereckige Dose sowohl auf, wie in der Wand montiert werden.

Für Montagen auf der Wand werden die Rohrdosen elfenbeinartig glasiert, für die Montagen in der Wand unglasiert geliefert.

Die eigenartige Gestalt der Klemmen (Fig. 293 f) in diesen Rohrdosen ermöglicht ohne weiteres, mehrere Drähte durch eine Klemmschraube zu befestigen. Zwei Drähte gleicher Stärke können nebeneinander, solche ungleicher Stärke zu Ösen gebogen übereinander gelegt und festgeklemmt werden.

Die beiden vorstehend beschriebenen Rohrdosen gestatten die Ausführung aller in der Praxis vorkommenden Schaltungen (Fig. 293 g) mit einem und demselben Modell und einigen Verschlussplatten. Die Montage wird also ausserordentlich einfach und bequem, weil es nicht erforderlich ist, erst an Ort und Stelle die Leitungsführung überall im einzelnen festzulegen und danach die erforderlichen Dosen nach Zahl und Lage der Abzweigungen zu bestimmen. Der Monteur kann sich vielmehr an Ort und Stelle aus dem Sockel und den geeigneten Verschlussplatten, d. h. bei der runden Dose aus nur zwei, bei der viereckigen Dose aus nur fünf verschiedenen Stücken die gewünschte Dosenform selbst herstellen.

Die Sockel beider Modelle, welche unglasiert sind, können auch als Einlagen in Papp- oder Metallschutzdosen an Stelle von Abzweigscheiben verwendet werden. Es sind jedoch bei der letzteren, je nach der verlangten Schaltung, zwei oder drei Klemmschrauben an jeder Verbindungsstelle notwendig; bei den hier beschriebenen Rohrdosen werden dagegen, wie oben erwähnt, mehrere Drähte mit einer Schraube befestigt, und man kann daher mit denselben die gleichen Abzweigungen herstellen, wie mit zwei verschiedenen Ausführungen von Abzweigscheiben.

Die Verlegung von Leitungen in Rohre ohne isolierende Auskleidung.¹⁾

179.
Die Zweck-
mässigkeit
unausgeklei-
deter Rohre.

Schon vielfach hat man isolierte Leitungen in Gasrohr ohne isolierende Auskleidung verlegt, nur hat man ein gut isoliertes Leitungsmaterial verwendet, indem man von der Anschauung ausging, dass bei einem Metallrohr mit isolierender Einlage der in das Rohr verlegte Draht durch seine Isolierung, die man in Anbetracht der isolierenden inneren Auskleidung des Rohres weniger gut wählt, nicht vor dem schädlichen Einfluss etwa eindringenden Kondenswassers geschützt wird. Dasselbe wird sich, wie sich aus Fig. 294 b ergibt, zwischen der isolierenden Einlage *J* und dem weniger

1) Nach einer Arbeit, welche der inzwischen leider verstorbene PESCHL dem Verfasser zur Verfügung gestellt hat.

Seiten hinsichtlich des Schutzwertes der Erdung aufgetaucht sind, ist von der Sicherheitskommission eine Spezialkommission eingesetzt worden, welche sich mit der Frage beschäftigen sollte, ob die Erdung so ausgeführt werden kann, dass sie für Menschenleben einen Schutz gewährt. Die Kommission bringt in ihrem Gutachten gelegentlich der Besprechung eines Dreileiter-systems mit blankem Mittelleiter und 2×250 Volt folgenden Vorschlag:

Man kann auch einen guten Sicherheitszustand herstellen, indem man die äusseren Leiter mit kräftigen Metallumhüllungen versieht und diese sehr gut mit dem Mittelleiter verbindet oder als Teile desselben wirken lässt. Entsteht dann eine Berührung zwischen Aussenleiter und leitender Umgebung, so bilden dieselben sofort einen vollen Kurzschluss, dann ist aber die Sicherung auf diesen Kurzschluss gestellt.“

Die Schwierigkeiten, diese Vorschriften auszuführen, waren bisher darin zu finden, dass man hierfür wirklich geeignetes Material auf dem Markt nicht erhalten konnte. Metallrohrsysteme als Schutzgehäuse sind vielfach verwandt. Man hat z. B. die elektrischen Leitungen in Gasrohre eingelegt und so vor mechanischer Beschädigung geschützt.

Gasrohr eignet sich schlecht zur Verlegung elektrischer Leitungen, da sich in demselben häufig Splitter befinden, welche beim Einziehen der Leitungen in die Isolation eindringen und dann zu Störungen aller Art Veranlassung geben. Diese entstehen nicht dadurch, dass die Leitungen in blanken Metallrohren liegen, sondern durch die losgelösten Splitter.

Eine englische Firma stellt deshalb Eisenrohre her, welche innen und aussen mit Emaille überzogen sind. Ausserdem werden in Frankreich, Dänemark und der Schweiz elektrische Leitungen, welche in oder auf dem Verputz verlegt sind, vielfach in Messingrohre eingezogen. England hat mehrere Systeme, bei denen glattwandige Metallrohre zur Herstellung von elektrischen Leitungen Verwendung finden. In Deutschland bedient man sich ausser des Gasrohres sehr viel starkwandiger Metallrohre, welche innen noch mit einer Isolierschicht aus Papier, Hartgummi u. s. w. überzogen sind. Leider sind jedoch diese Rohre zu teuer, so dass sie nur in den seltensten Fällen Verwendung finden.

Diese Rohrsysteme werden sämtlich wie Gas- und Dampfleitungen durch Schraubverbindungen zusammengesetzt. Sie würden sich daher ohne weiteres zur Herstellung eines geerdeten Schutzgehäuses eignen, wenn nicht die Schraubverbindungen vielfach als elektrisch nicht dicht zu bezeichnen wären, dass sie also einen nicht genügend guten elektrischen Kontakt geben, während nicht bestritten werden soll, dass unter gewissen Umständen mit Schrauben an sich sehr gute elektrische Kontakte hergestellt werden können.

Da die ganze Sicherheit eines geerdeten Schutzgehäuses für Hochspannungsleitungen ausschliesslich auf der sicheren Kontaktbildung der einzelnen Stücke untereinander beruht und das Rohrsystem in seiner ganzen Länge gut leitend sein muss, so sind die Schraubverbindungen in der jetzigen Ausführung nicht zu empfehlen. Jeder schlechte Kontakt bedeutet aber eine Gefahr, denn das Rohrsystem würde in diesem Falle nur ein falsches Gefühl der Sicherheit hervorrufen.

Die Herstellung guter Kontakte, unabhängig von der Zuverlässigkeit der Monteure, ist die Hauptaufgabe zur Lösung der Frage. Gelingt es, dafür eine Lösung zu finden, so kann das Rohrsystem nicht nur als Schutzrohrsystem für Hochspannung, sondern auch als geerdeter rohrförmiger Leiter

bringen müssen. Die Rohrstücke werden untereinander mit gewöhnlichen Muffen verbunden, wie dieses ja bei Gas- und Wasserleitungen u. s. w. auch der Fall ist. Die Muffen (Fig. 297 a) haben in der Mitte eine Einschnürung und zwei Schaulöcher.

Die Einschnürung ist so tief gewählt, dass sie den Rohrrand des eingeschobenen Rohres überdeckt und gleichzeitig ein zu tiefes Einschieben desselben von der einen Seite verhindert. Die Muffen sind so lang, dass ein guter, zuverlässiger Kontakt gebildet wird. Zur Beobachtung einer richtig ausgeführten Verbindungsstelle sind die Schaulöcher von grossem Vorteil, denn man sieht durch dieselben, ob die Rohre vorschriftsmässig tief eingeführt sind oder nicht. Zur Verbindung von zwei Rohrenden, deren eines

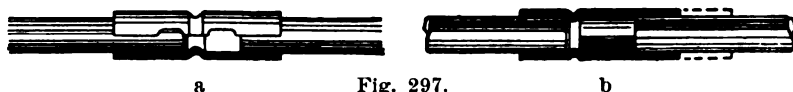


Fig. 297.

Ende festgelegt ist, dient die sogenannte Kupplungsmuffe (Fig. 297 b) und diese hat denselben Zweck wie die ähnliche Konstruktion bei Gas-, Wasser- oder Dampfrohren. Im Gegensatz zu der gewöhnlichen Muffe ist bei der Kupplungsmuffe der eine Muffenteil so lang ausgebildet, dass es möglich ist, die Muffe über das eine Rohr so weit zurückzuschieben, bis das andere Rohr am anderen Ende der Muffe eingeführt werden kann. Die Verwendung der Kupplungsmuffen ist besonders da zu empfehlen, wo die Rohre von zwei Seiten aus verlegt werden. Man ist dadurch imstande, jederzeit einzelne Leitungen, sowie Teile des Rohrnetzes auszuwechseln, so dass den Sicherheitsvorschriften genügt wird.

Die Reduktionsmuffen (Fig. 298) gestatten eine Verwehdung von Rohren geringeren Durchmessers mit Rohren oder Passstücken von grösserem Durch-

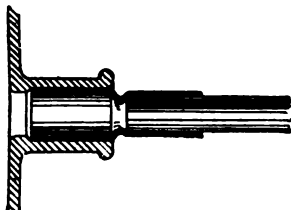


Fig. 298.

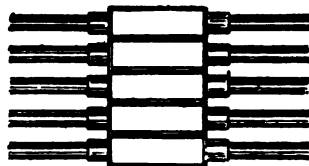


Fig. 299.

messer und sind in der Weise ausgeführt, dass die eine Hälfte der Muffe zum Einschieben und die andere Hälfte zum Überschieben über den nächstkleineren Rohrdurchmesser geeignet ist. So würde sich z. B. eine Reduktionsmuffe von 28 auf 23 mit dem grösseren Teil in eine Bohrung für 28er-Rohr einschieben lassen, während in den kleineren Teil das 23er-Rohr eingeschoben werden könnte. Auch hier sind solche Einschnürungen angebracht, so dass vorstehende Rohrkanten schädliche Einwirkungen nicht ausüben können.

Bei sehr langen geraden Leitungen, sowie kurz vor einer Anzahl von Krümmungen ist es erwünscht, den Draht nochmals zugänglich zu machen, ohne dass man gezwungen ist, eine grosse Dose einzusetzen. Für diese Zwecke dienen sogenannte Zwischenkasten, die nur wenig breiter als die Rohre sind.

zuföhren (Fig. 300 c—g) und man kann durch das grössere oder kleinere Zwischenstück die Rohranordnung so treffen, dass dem nachträglichen Durchziehen von Leitungsdrähten der geringste mechanische Widerstand entgegengesetzt wird.

Um in einfacher Weise mehrere Bogen mit demselben Konstruktionsteil ausführen zu können, haben HARTMANN & BRAUN A.-G. biegsame Rohrkuppungen vorgeschlagen, die aus geflochtenem oder geklöppeltem Drahtschlauch

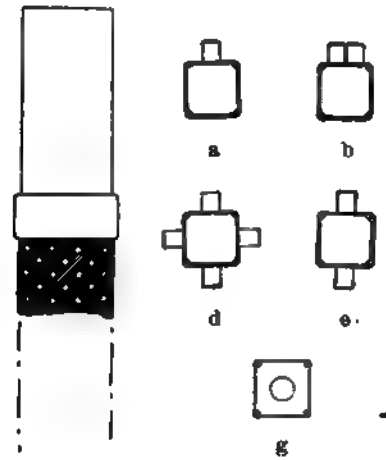


Fig. 303.

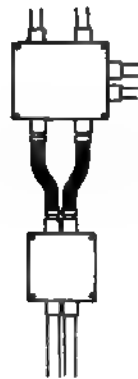


Fig. 301.

Fig. 304.

Fig. 302.

(Fig. 301) bestehen, an dessen Enden Rohrstücke zur Verbindung mit Abzweigkasten, Muffen u. s. w. befestigt sind. Die SIEMENS-SCHUCKERT Werke verwenden für den gleichen Zweck Pforzheimer Metallschlauch. Im übrigen ist es HARTMANN & BRAUN A.-G. gelungen, eine Vorrichtung zu konstruieren, welche das geschlitzte Stahlrohr in bequemer Weise zu biegen gestattet.

Für die Umgebung von rechten Winkeln sind Winkelkasten vorhanden, bei welchen der Winkel innen, aussen und oben durch einen Deckel abgeschlossen ist (Fig. 302). Bei allen Kasten ist darauf Bedacht genommen, dass zum Arbeiten und zum Einziehen der Leitungsdrähte den Leitungsquerschnitten entsprechend ein genügend grosser Raum vorhanden ist.

In Fig. 306 ist die Anwendung von Universal-Abzweigdosen zur Schaltung von zwei Lampengruppen mit Umschalter veranschaulicht. In Fig. 306a dienen die Rohre den Leitungen nur als Schutz; sie sind durch Verschlussbleche hindurch in die Dose geführt. In Fig. 306b dienen die seitlichen und oberen Rohre, die durch Stutzen mit der Dose verbunden sind, als Stromleiter; parallel geschaltete Kupferdrähte sind durch grossköpfige Schrauben mit der Dose verbunden.

Sollen die Leitungen durch Decken geführt werden, so ist es zweckmässig, dieselben, wie z. B. in Fig. 307 dargestellt, durch ein übergeschobenes Gasrohr zu schützen, damit Aufwaschwasser in die Rohre nicht eindringen kann.

Sehr häufig kommen bei Montagen Stellen vor, die eine besondere Biegung des Rohres wünschenswert erscheinen lassen, die Schlitzrohre können jedoch nur nach einer Seite hin gut gebogen werden. Dies reicht in der Praxis nicht aus. Es werden deshalb dem Material nahtlose Rohre beigegeben. Die Rohrstücke sind oben und unten so weit aufgetrieben, dass sie eine Muffe bilden, in welche das Federrohr direkt eingeschoben werden kann (Fig. 308).

Diese Rohre sind weich und können ohne besondere Schwierigkeiten nach Bedarf gebogen werden, wie z. B. in Fig. 309 (im übrigen siehe S. 278).

Fig. 310 zeigt einen Fall, der in der Praxis sehr häufig vorkommt. Durch die Wände treten die Leitungen in eine Dose und werden nach dem Ausschalter und dem Lüster weitergeführt. Da es zweckmässig ist, so wenig wie möglich Modelle von Dosen am Arbeitsplatze zu haben, hat man die Winkeldosen weggelassen. Die oben beschriebene Aufgabe wäre also, wie im Schema angedeutet, zu lösen.

Fig. 311 zeigt die Ausführung einer Mauerdurchführung, wobei auf der einen Seite eine Dose für einen Ausschalter verwendet ist, welche mittels eines Dübels in der Wand fest sitzt, während auf der anderen Seite nur ein T-Stück zum Anschluss dient.

Für die Abzweigung von Doppelleitungen, sowie auch für die Abzweigung von Einzelleitungen sind die nötigen Passstücke vorhanden. Auf einen Kasten für die Abzweigung einer Hauptleitung von 2×220 Volt und mehr sei besonders hingewiesen (Fig. 312). Der Kasten besteht aus Gusseisen und ist in seinem Innern in zwei Zellen eingeteilt. Die beiden Hauptleitungen führen an der einen Seite durch den Kasten, und zwar liegt dabei die eine Leitung in der einen Zelle offen, während die andere durch einen angegesenen Schutzdeckel von der Zelle abgetrennt ist. Eine direkte Berührung der beiden Aussenleiter untereinander ist also ausgeschlossen. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Abzweigvorrichtungen soll ein Ablöten der abgezweigten Leitungen verhindert, ebenso die abgezweigte Leitung nicht mittels eines aufgelöteten Kabelschuhes angeschlossen werden. Zu diesem Zweck sind sowohl Hauptleitung wie abgezweigte Leitung mit einer sogenannten Verbindungsklemme (VK) der SIEMENS-SCHUCKERT Werke ausgerüstet und untereinander durch einen gewellten Metallstreifen verbunden. Diese scheinbar teure Anordnung bietet sowohl elektrisch als auch in der Montage so viel Vorteile, dass sie in der That bedeutend besser und billiger auszuführen ist als eine gewöhnliche Lötverbindung.

Will man diese Abzweigkasten nicht verwenden oder hat man Drehstromanlagen, so empfiehlt es sich, Hauptabzweigungen zu verwenden, wie sie von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in den Handel gebracht

gerollt, so dass die beiden Kanten des Streifens dicht voreinander liegen und gegeneinander federn, werden dann innen und aussen mit einem Emaille-überzug versehen und bilden so ein Isolierrohr, welches gleichzeitig durch den Überzug gegen Rost geschützt und dessen Schlitz verschlossen ist. Die einzelnen Rohre werden dann mit dazugehörigen Passstücken einfach ineinandergeschoben und durch die Emaille abgedichtet.

Vor dem Emaillieren können die Stossenden auch noch verlötet werden, wenn eine besonders gute Abdichtung erforderlich sein sollte. Ferner werden

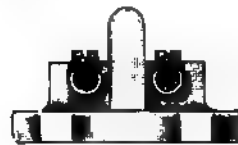


Fig. 326.

b



a



c

Fig. 327.

d

die Rohre auch mit Gewinde geliefert, so dass die Passstücke aufgeschraubt werden und wie Gas- und Dampfleitungen verlegt werden können. Die Arten der Verbindung dieser Rohre zeigt Fig. 326. Bei Verwendung im Freien, wo die Rohre starken Witterungswechseln ausgesetzt sind, verwendet man dieselben galvanisch verzinkt.

Die Simplex-Steel Conduit Co. fabriziert neben den gewöhnlichen geschlossenen Verbindungsstücken auch grosse und kleine Bogen und Halbbogen (Fig. 327a), T-Stücke (Fig. 327b), sowie Bogenstücke mit Deckel (Fig. 327c).

einer rauen Behandlung ausgesetzt sind. Eine Schwierigkeit liegt allerdings in der Abzweigung, da ein dort entstandener Fehler nur sehr schwer auffindbar ist.

Bei grossen Stromstärken, für welche eine Stahldrahtarmatur nicht ausreicht, resp. einen zu grossen Spannungsverlust herbeiführt, werden zwischen die Stahldrähte ein oder mehrere Kupferdrähte eingelegt, welche in paralleler Schaltung mit den Drähten der Armatur den Strom weiterleiten.

Hausanschlüsse.

Hausanschlüsse gehören in den meisten Fällen noch zum Leitungsnetz der Elektrizitätswerke. Sie müssen, da sie nicht immer schnell zugänglich, so sicher wie möglich installiert werden.

Fig. 331.

Die Ausführung derselben richtet sich nach der Art der Verteilungsleitungen, die unterirdisch als Kabel oder blanko Leitungen oder oberirdisch als Freileitungen geführt sein können.

181. Der Anschluss an ein Kabelnetz erfolgt entweder unter Vermittelung eines Kabelkastens oder einer Abzweigmuffe. Der erstere ist sicherer als eine Muffe, hauptsächlich wenn die Verteilungsleitungen von beiden Seiten gespeist werden, weil dann innerhalb des Kastens nach beiden Seiten gesichert wird und Störungen auf ein kleineres Gebiet beschränkt bleiben. Indessen ist diese Art der Ausführung viel zu teuer und findet nur dann statt, wenn gleichzeitig von einem Punkt mehrere stärkere Kabel abgehen müssen.

Die Abzweigmuffen, deren Konstruktionen an anderer Stelle¹⁾ bereits besprochen wurden, sind das üblichste Mittel. Sie werden mit und ohne Sicherung verwendet. Wird aber gesichert, so pflegt man den Schmelzstreifen etwas stärker zu wählen als den im Hause selbst angeordneten.

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 48 u. ff.

werden, von denen man nach Isolatoren überspringt, die am Gebäude befestigt sind. Die ersteren werden so angeordnet, dass sie ein bequemes Abspannen ermöglichen. So werden bei Dreileiteranschlüssen z. B. drei Isolatoren nebeneinander gesetzt (Fig. 332 a, SIEMENS-SCHUCKERT Werke, Wien) oder, wenn die Isolatoren auf eisernen Traversen sitzen, die in Fig. 332 b wiedergegebene Art gewählt.

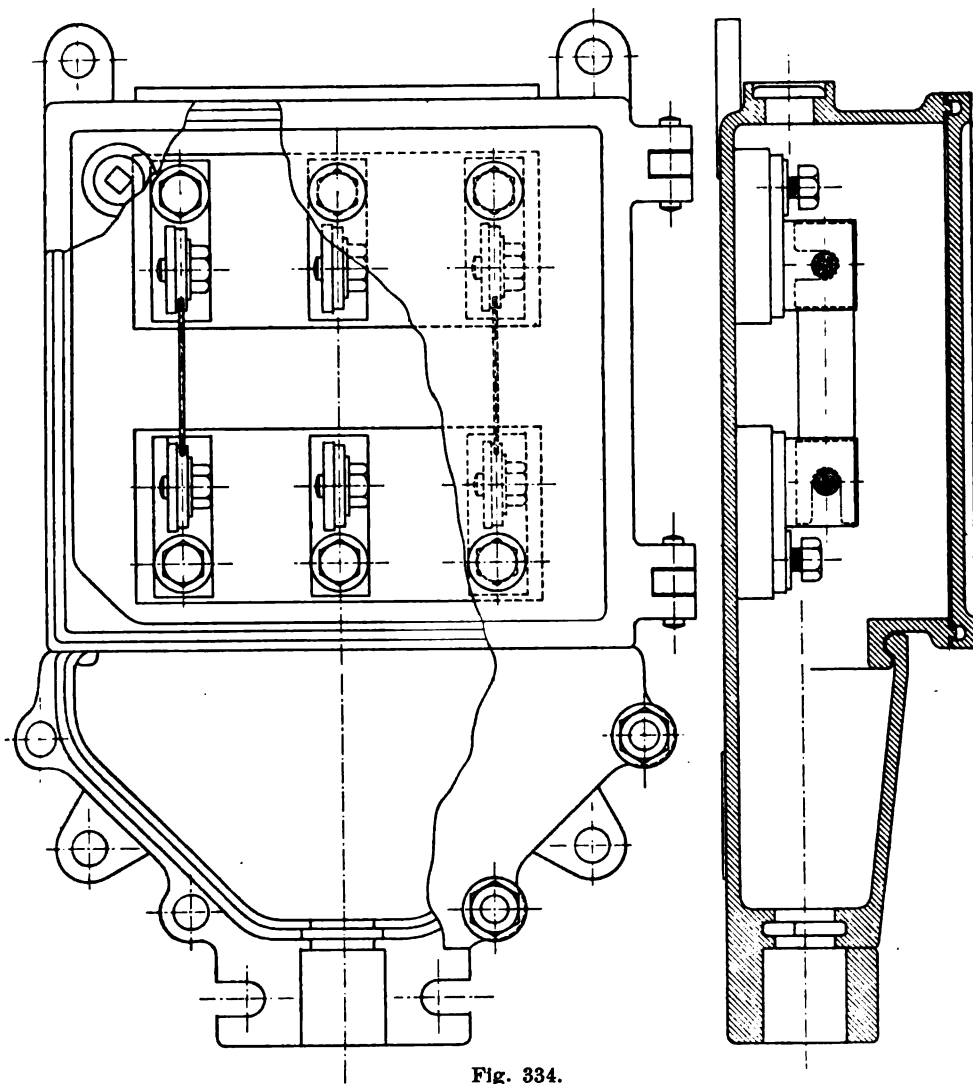


Fig. 334.

Am Hause werden die Leitungen an Isolatoren abgefangen und dann durch Einführungsstüben¹⁾ geführt. Die SIEMENS-SCHUCKERT Werke, Wien, kombinieren diese Einführungen mit den Isolatoren in der in Fig. 332 c wiedergegebenen Form. Eine andere Ausbildung des Hausanschlusses giebt MILLER,²⁾ die in Fig. 332 e wiedergegeben ist.

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 240.

2) MILLER, Versorgung der Städte mit Elektrizität.

ringere Querschnitte zu verlegen sind, so werden die in Fig. 274 wiedergegebenen Bergwerksisolatoren angewendet. Eine derartige Installation zeigt Fig. 343. Die gewöhnlichen Rollen (Fig. 261) sollte man für diese Zwecke nie verwenden.

Isolierte Leitungen können Verwendung finden, wenn sie ebenfalls gegen die Säure geschützt werden. Bezüglich der gasdichten Wanddurchführungen vergleiche S. 242.

186.
Installationen in feuchten und durchtränkten Räumen und solchen mit stehenden Dämpfen.

Für Installationen in feuchten Räumen ist mit Gummiader isolierter Kupferdraht zu verwenden, welcher auf Isolatoren verlegt werden soll. Auch blanke Leitung ist für Niederspannung zulässig, jedoch nur unter den in § 41b der Sicherheitsvorschriften gegebenen Einschränkungen. Bei Spannungen über 1000 Volt sind nur Kabel zulässig.

Die zur Verwendung kommenden Drähte (auch solche, die nur einer Glühlampe dienen) sollen nicht unter 1 mm sein. Die Isolatoren sollen mit gutem Cement eingemauert und stets sein, damit Nebenschlüsse durch Feuchtigkeit, die sich bei toren (bei steigender Leitung u. s. w.) im Innenraum dem kann, vermieden werden.

Der Draht ist vor der Befestigung am Isolator an den Isolierband zu bewickeln, damit die Isolation der Leitung wird. Wenn bei Mauerdurchgängen die Leitungen nicht f werden können (wegen grosser Mauerstärke, Bögen u. s. w.), das Mauerwerk berühren, werden Hartgummirohre von 20 mm eingemauert, wobei jedoch zu beachten ist, dass das Rohr besteht und auf jeder Seite der Mauer etwa 2 cm herausrag

Statt der offenen Verlegung kann auch die Verlegung wendung finden, und zwar empfehlen sich für diesen Zweck ganz besonders.

Beide Pole sind bei offener Verlegung entsprechend d nissen soweit wie möglich voneinander entfernt zu verlegen. Seiten erst nach der Lampe abzuzweigen. Wichtig ist der Lampen. SCHÜCKERT wendete die folgende Montageart an:

Die Lampen (Kellerfassungen) bestehen aus einem en schirm, an dessen Unterseite zwei Porzellanrollen befestig. Mitte des Schirmes befindet sich eine Öffnung, durch die eines Fassungsalters mit Bügel gesteckt wird (Fig. 344), zum Aufhängen des Ganzen dient und an das Gewinde die Fassung angeschraubt werden kann. Diese letztere ist ein Porzellanstück, an dem der metallene Gewindeteil zur Aufnahme der Glühlampe sitzt. Dieser Gewindeteil dient gleichzeitig als Pol und ist mit einer Schraube zur Festklemmung des Leitungsdrahtes versehen. Der zweite Pol wird durch eine Schraube gebildet, die innerhalb des Gewindeteils in den Porzellankörper eingeschraubt wird und mit welcher man gleichzeitig den durch eine seitliche Durchbohrung des Porzellansockels eingeführten Leitungsdraht des zweiten Pols festklemmt.

Es ist selbstverständlich, dass ein Anheften der Leitung, auch geerdeter Mittelleiter, an die Wand vermittleis eiserner Krampen, sowie eine Führung auf Isolierrollen ausgeschlossen ist.

Zum Festhängen der Beleuchtungskörper (Kellerlampen) dienen S-Haken aus verzinktem Eisendraht von 4 mm Durchmesser (s. Fig. 344). Kommen Wandarme zur Verwendung, so müssen auch auf diese die Porzellanfassungen

darauf hingewiesen worden, dass in Gleichstromanlagen diesen störenden Einflüssen durch häufige Umkehrung der Stromrichtung wesentlich gesteuert werden kann.

In vielen Fabriken gesellen sich nun zur Feuchtigkeit noch Substanzen, welche dieselbe gut leitend machen. In erster Linie geschieht dies in chemischen Fabriken, Zuckerfabriken, in Gerbereien, gewissen Teilen der Schlacht- und Kühlhäuser. Durch die Einwirkungen der Säuren und Alkalien wird der Isolationswiderstand der ganzen Anlage ein wesentlich geringer; er ist überaus schwierig auf einer angemessenen Höhe zu erhalten. In gleichem Masse aber wie die Leitungen u. s. w. von den schädlichen Einflüssen mitgenommen werden, sind Einwirkungen auf den menschlichen Körper bemerkbar, der wesentlich weniger widerstandsfähig gegen elektrische Ströme wird. Durch beide Umstände sind die ersten Vorbedingungen für die persönliche Sicherheit¹⁾ gegenüber elektrischen Schlägen aufgehoben und es müssen in derartigen Anlagen Massnahmen getroffen werden, welche den Schutz des Arbeiters gewährleisten. Insbesondere wird die Leitungsverlegung so gewählt werden müssen, dass einmal der Isolationszustand der Anlage so günstig wie möglich wird und ferner müssen Schutzvorrichtungen den Arbeiter von der Berührung der Leitungen abhalten. Die weniger zugänglichen Leitungen können offen verlegt werden; es muss jedoch in jeder derartigen Anlage durch Plakate mit deutlich sichtbarer Schrift vor der Berührung der Leitungen gewarnt werden.

In solchen Räumen, in denen ätzende Dünste auftreten, treten die bereits vorher erwähnten störenden Einflüsse noch mehr hervor; in vielen Räumen hält kein Leitungsmaterial stand und muss häufig neu installiert werden. Verfasser schrieb²⁾ an anderer Stelle hierüber: „Es wird bei der Installation von Leitungen in derartigen Räumen zunächst die Frage aufzuwerfen sein, ob die üblichen Verlegungsarten genügen, wenn die Leitungen und die Befestigungsstellen durch einen Überzug aus irgend einer Farbe, einem Emaillelack u. s. w. den unmittelbaren Einwirkungen der schädlichen Substanzen entzogen werden. Bei Beantwortung dieser Frage ist in erster Linie die Örtlichkeit von ausschlaggebender Bedeutung. In vielen Fällen kann dieses Auskunftsmittel genügen, wenn es sich um gut gelüftete Räume handelt, es versagt sicher, wenn dies nicht der Fall ist.

Am häufigsten sind es wohl die Installationen in Viehställen, die zu vielen Klagen Anlass geben und zumeist sehr geringe Isolationswerte aufweisen. Handelt es sich um moderne, hohe und luftige Räume, so wird es genügen, blanke Kupferleitungen auf Bergwerksisolatoren oder Mittelspannungsrollen (Fig. 264) zu verlegen, wie gewöhnlich mit blankem Kupferbindendraht abzubinden und dann die Leitungen und die Verbindungsstellen sehr sorgfältig dreimal mit Porzellan-Emaillefarbe zu streichen. Die Stellen der Leitungen, welche an den Isolierstücken befestigt werden sollen, sind während der Verlegung schon einmal zu überstreichen und der Bindendraht vor Gebrauch in die Farbe zu tauchen, weil beim Streichen nach der Verlegung der Pinsel nicht an die Stellen zwischen Leitung und Rolle dringen kann, hier infolgedessen die Leitung ungeschützt bleibt und die Dämpfe ihre zerstörende Wirkung beginnen können. Sind die Räume niedrig, so dass

1) Näheres siehe im Kapitel „Persönliche Sicherheit“ Hdb. VI, 2.

2) POHL, Montage elektrischer Licht- und Kraftanlagen, Hannover 1903.

ratsam, da der Messingmantel zumeist nur eine Stärke von 0·1—0·2 mm hat, den chemischen Einflüssen also kaum lange standhalten kann. Nach der Verwitterung des Messingmantels wird das Papierrohr schnell zerstört.

Für Räume, in denen Salzsäure- oder Schwefelsäuredämpfe auftreten, genügen die im Vorstehenden besprochenen Anordnungen selten, um eine möglichst gute Isolation herbeizuführen. Die Verlegung von Stahlpanzerrohr dürfte, wenn ein geeigneter Überzug aus säurefester Emaillefarbe für die Rohre verwendet wird, noch am geeignetsten sein. Die Abdichtungen müssen sehr sorgfältig gemacht werden, Schalter und Sicherungen werden ausserhalb der betreffenden Räume untergebracht. Die Zuleitungen zu den Lampen sind auf dem kürzesten Wege zu verlegen. Die Einführung in die Lampen erfolgt zweckmässig unter Benutzung einer gusseisernen Dose, in die das Rohr mit Mennige fest eingeschraubt wird und in deren Deckel der Anschluss für den Beleuchtungskörper mit Gasgewinde eingedreht wird. Alle Lampen müssen mit Überglocken, die dicht schliessen, versehen sein. Die Armatur selbst besteht aus Porzellan. Als sicheren Schutz kann man die Umhüllung der blanken Leitungen mit Blei ansehen, sei es, dass dieselben auf galvanischem Wege verbleit sind, sei es, dass sie mit einem nahtlosen Mantel aus Blei umpresst werden. Mit Blei umpresste Leitungen liefert jedes Kabelwerk, die Umpressung erfolgt, wie beim Bleikabel, in der Bleipresse. Die Verlegung erfolgt auf Isolatoren, die Befestigung durch in Teer getränkte Hanfschnur oder mit Bleidraht.

Die Installation bleigeschützter Leitungen an sich macht keine wesentlichen Schwierigkeiten, nur müssen sie, zumal wenn sie nur verbleit sind, mit der grössten Sorgfalt behandelt werden, um die Schutzschicht nicht zu beschädigen. Man verwende möglichst ungeteilte Leitungen und verlege Abzweigstellen ausserhalb der säurehaltigen Räume, selbst wenn dadurch eine erheblich grössere Menge von Leitungen verwendet werden sollte. Ist die Herstellung einer Abzweigstelle innerhalb des Raumes aber nicht zu umgehen, so kann sie auf die folgende Art sicher hergestellt werden. Nachdem die durchgehende Leitung auf einer kurzen Strecke vom Blei befreit und die abzweigende Leitung in üblicher Weise ohne Verwendung von angreifenden Säuren abgelötet ist, wird der Bleimantel sorgfältig von der Oxydschicht befreit und durch Auftragen von metallischem Quecksilber mittels eines Leinwandläppchens gut verquickt. Die Abzweigstelle wird dann mit flüssigem Blei umgossen. Als Hilfsmittel hierzu wird eine zweiteilige, gut angewärmte Form verwendet, die mit einer Eingussöffnung und zwei seitlich angebrachten Löchern, durch welche die Luft entweichen kann, versehen sein muss. Die Form muss mindestens so breit hergestellt werden, dass auf jeder Seite die ungelösten Bleimäntel auf mindestens 5 cm mit Blei umgossen werden. Damit möglichst Blasenbildung beim Eingiessen vermieden wird, durch die die Abzweigstelle nicht mehr zuverlässig sein würde, muss das Blei sehr langsam und nicht zu heiss eingegossen werden. Die Abzweigstellen sind so zu befestigen, dass ein Zug weder auf die Lötstelle, noch auf den Bleimantel ausgeübt werden kann.

Werden Kabel verwendet, so ist ihre Isolierung den chemischen Einflüssen durch einen Bleimantel zu entziehen, der sich über der etwa vorhandenen Eisenarmatur befinden muss. In diesem Falle hätte das Kabel also zwei Bleimäntel. Werden die Kabel in das Mauerwerk gelegt, so müssen sie in Gips gebettet werden. Über den Gips darf dann der gewöhnliche Putz geworfen werden.

zweige zu den einzelnen Häuschen nach Fig. 345 hergestellt. Die Verlegung der Gummiader erfolgte in Stahlpanzerrohr in den folgenden Räumen: Patronenhäuschen, Verpackung, Abscheidung, Waschhaus und Nitrierung.

Überhaupt keine Leitungen wurden in das Sprengöllager, Kollodiumwolle-Trockenhaus, Menghaus und Salpetermulde eingeführt. Die Beleuchtung erfolgte daher von aussen durch die Fenster.

188.
Die Instal-
lation in
Schau-
fenstern,
Waren-
häusern etc.

Die vielfachen Schaufensterbrände, die ihre Ursache meistens darin finden, dass leichte Stoffe den Lichtquellen zu nahe gebracht werden, haben zu strengeren Massnahmen der Polizeiverwaltungen geführt.¹⁾ Vielfach ist auch beobachtet worden, dass Stoffe an Schnurleitungen durch Stecknadeln oder dergl. befestigt und hierdurch Kurzschlüsse eingeleitet wurden.

Es ist daher in erster Linie Bedingung, die Leitungen gegen mechanische Beschädigungen zu schützen. Es ist dies nicht schwer, wenn Rohrverlegung gewählt wird und die Anschlüsse an die fest montierten Beleuchtungskörper so erfolgen, dass die Leitungen an keiner Stelle freiliegen.

Wesentlich schwieriger ist die Stromzuführung zu transportablen Beleuchtungskörpern, von denen übrigens stets nur einer an eine Leitung angeschlossen werden darf. Gerade für die Dekorationen in Warenhäusern und Schaufenstern ist aber die elektrische Beleuchtung von grösster Bedeutung. Durch geschickt angeordnete Glühlampen können wundervolle Effekte erzielt werden, so dass auf die Beweglichkeit der Armaturen nicht gern verzichtet wird.

1) Der Polizeipräsident in Berlin hat unter dem 1. März 1904 eine Verfügung über Beleuchtung der Schaufenster und Schaukästen erlassen, die, soweit sie sich auf elektrische Anlagen bezieht, wiedergegeben sei.

1. Beleuchtung durch Bogenlampen:

- a) Der Raum, der die Bogenlampe enthält, ist in der ganzen Breite und Tiefe des Schaufensters durch mindestens $2\frac{1}{2}$ mm starke, in Metallrahmen verlegte Glasplatten, welche thunlichst unmittelbar unter der Lampe anzubringen sind, von den ausgelegten Waren abzutrennen.
- b) Der Raum über den Glasplatten darf zur Auslage von brennbaren Gegenständen nicht benutzt werden.

2. Beleuchtung durch Glühlampen oder andere diesen gleichzustellende Beleuchtungskörper (z. B. Nernstlampen, Osmiumlampen, Lilliputbogenlampen):

- a) Glühlampen und ähnliche Beleuchtungskörper dürfen im Auslegeraum nur in feuersicheren Schutzkästen oder in Glasglocken (Überglocken), welche mit ausreichenden, den Luftdurchzug gestattenden Öffnungen versehen sind, angebracht werden.

Die Fassungen müssen dabei derart mitumschlossen sein, dass sie mit den ausgelegten Waren nicht in Berührung kommen können.

- b) Die Leitungen müssen in Isolierrohren verlegt sein. Bewegliche Leitungen innerhalb des Auslegeraumes sind nicht zulässig.
- c) Die ausgelegten Waren sind in angemessenem Abstände (etwa 10 cm) von den Beleuchtungskörpern zu halten.

II. Für Schaukästen, welche im Innern beleuchtet werden und leicht entzündliche Gegenstände enthalten, gelten, sofern sie in den Eingängen oder Durchfahrten von Geschäftshäusern angebracht sind, die gleichen Bestimmungen wie für die Beleuchtung der Schaufenster.

Befinden sich die Schaukästen an der Strassenfront, so können, je nach Lage des Einzelfalles, die Anforderungen nach jenen Vorschriften ermässigt werden. Zum Beispiel können Glühlampen von nicht mehr als 40 Watt Elektrizitätsverbrauch ohne Einhaltung eines Mindestabstandes von den ausgelegten Waren verwendet werden, wenn die Lampen von einer ventilierten Glashülle vollständig umschlossen und wenigstens 20 cm voneinander entfernt und die Schaukästen selbst mit Ventilation versehen sind.

kammern Schlagwetter auftreten können, müssen alle Vorsichtsbedingungen erfüllt werden, um eine Entzündung der Schlagwetter zu vermeiden.

Infolge der Eigenart des Bergwerksbetriebes müssen wir, abgesehen davon, dass bereits das Vorhandensein von Schlagwettern eine besondere Wahl und Verlegungsart des Leitungsmaterials erfordert, noch trennen in solche Teile, welche senkrecht einfallen (Schächte), sowie solche Strecken, welche eine grössere Neigung als 45° gegen die horizontale haben und in solche, welche horizontal verlaufen oder eine geringere Neigung als 45° aufweisen.

Leitungen in schlagwetterfreien Gruben.

1. Schächte und einfallende Strecken von mehr als 45° Neigung.

192.
Leitungen
in Schäch-
ten.
Wahl des
Leitungs-
materials.

Für die in diesen Teilen des Bergwerkes zur Verlegung kommenden Leitungen liegen ganz besonders schwierige Verhältnisse vor. Es ist einmal zu berücksichtigen, dass die engen Schächte, welche zumeist für die Förderung in Anspruch genommen werden und in denen alle möglichen Rohrleitungen liegen, eine längere Montage nicht zulassen, dass ferner durch den Betrieb an sich gewisse Gefahren für die Leitungen bestehen und dass schliesslich auch die häufig auftretenden chemischen Bestandteile der Grubenwässer einen einschneidenden Einfluss auf die Wahl des Leitungsmaterials ausüben müssen. Es darf auch nicht vergessen werden, dass die elektrischen Leitungen oft an schwierig zugänglichen Orten liegen und dass infolgedessen nur solches Material verwendet werden kann, welches so wenig wie möglich einer Wartung bedarf.

Alle vorerwähnten Gründe sind dafür massgebend, dass in den hier zunächst in Frage kommenden Teilen der Bergwerke nur Kabel zugelassen werden dürfen, welche eine Armatur aus verzinkten Eisen- oder Stahldrähten besitzen. Aber auch schon durch die später beschriebene Art des Einhängens der Kabel in die Schächte muss diese Armatur gewählt werden, da sie so beschaffen sein muss, dass sie die gesamte Fabrikationslänge des Kabels frei tragen kann.

Die für Bergwerke bestimmten Kabel sind bereits an anderer Stelle besprochen worden, auf die hier verwiesen sei (Hdb. VI, 1, S. 184); ihre Verlegung in Schächte ist in diesem Band unter „Kabelverlegung“ (Hdb. VI, 2, S. 109) behandelt.

Diese Konstruktionen zeigen sämtlich einen Bleimantel über der die Leiter umhüllenden Isolationsschicht, jedoch kann derselbe weggelassen werden, wenn die an seine Stelle tretende Hülle dem Blei an Widerstandsfähigkeit mindestens gleichkommt. Vielfach finden Gummikabel Verwendung.

In verschiedenen Bergwerken üben die Grubenwässer einen starken chemischen Einfluss auf die Kabel und insbesondere auf deren Eisenarmatur aus und ist es daher erforderlich, einen besonderen Schutz zu schaffen, der in der Regel aus einem Anstrich mit Teer bestehen wird. Sollten die chemischen Einflüsse jedoch derart sein, dass ein solcher Anstrich nicht den genügenden Schutz erwarten lässt, so wird das Kabel mit einem zweiten Bleimantel versehen, welcher über der Eisenarmatur angeordnet wird. Da es nun aber beim Umpressen des Kabels mit dem Bleimantel nicht aus-

nach 24stündigem Liegen im Wasser der halbstündigen Einwirkung eines Wechselstroms von 2000 Volt zwischen Kupferseele und Wasser widersteht.

Beträgt die Spannung weniger als 125 Volt, so kann die Leitung in jeder beliebigen Höhe verlegt werden, muss jedoch, da bei der Berührung von Leitungen, welche mit diesen geringen Spannungen arbeiten, Gefahren für den Menschen immerhin nicht ausgeschlossen erscheinen, genügend geschützt werden. Entweder erfolgt dann die Verlegung auf Isolatoren, die durch Schalbretter verkleidet werden, oder die Leitungen werden in Rohr verlegt, dessen Eisenmantel geerdet wird.

Alle isolierten Leitungen werden auf Isolatoren verlegt, und zwar sind die folgenden Abstände zwischen den Leitungen innezuhalten: bei Spannweiten von mehr als 6 m mindestens 20 cm, bei Spannweiten von 4—6 m mindestens 15 cm, bei Spannweiten von 2—4 m mindestens 10 cm und bei solchen von höchstens 1 m mindestens 5 cm.

Alle Isolatorenträger werden mit Cement im Gestein befestigt; wenn Schachtzimmerung vorhanden ist, können sie mit Holzschrauben befestigt werden. Auf den Isolatoren werden die Leitungen mit verzinntem Kupferbindendraht abgebunden, die entsprechenden Stellen der Leitungen jedoch vorher mit Isolierband umwickelt, damit der Bindendraht nicht in die Isolierung einschneiden kann. Wo chemische Einflüsse befürchten lassen, dass metallener Bindendraht nicht hält, wird geteerte Hanfschnur verwendet.

Sind die Leitungen fertig verlegt, so müssen sie mit einem Anstrich versehen werden, welcher durch die in der Grube herrschende feuchte Luft nicht angegriffen wird und imstande ist, die Isolierung gegen chemische Einflüsse zu schützen.

Dieser Anstrich ist aber ziemlich schwierig herzustellen, da einmal viele Farben auf der fettigen Leitung sehr schlecht haften, die Leitung auch während und nach der Verlegung sofort beschlägt, wodurch das Haften der Farbe sehr behindert wird. Man muss daher die Leitungen sehr gut trocken reiben, nur ganz kurze Stücke nacheinander streichen und den Befestigungsstellen ganz besondere Sorgfalt widmen. Da der Anstrich auf die Dauer nicht hält, so muss er mindestens alljährlich wiederholt werden.

Ausser der Verlegung auf Isolatoren können auch Rohre überaus vorteilhaft verwendet werden; sie sind jedoch nur zulässig bis zu Spannungen von 250 Volt gegen Erde. Die Rohre müssen einen Stahl- oder Eisenmantel besitzen, welcher an den Stossstellen leitend zu verbinden ist. Aus diesem Grunde sind, soweit es sich um trockene Stellen handelt, die auf Seite 270 u. ff. dieses Bandes beschriebenen PESCHELSchen Stahlrohre besonders bequem. In feuchten Räumen jedoch, wo durch den Schlitz Wasser in das Innere eindringen kann, verwende man Stahlpanzerrohre von BERGMANN, deren Stossstellen gut abzudichten sind.

Das Abdichten, welches in der Regel mit Hanf und Mennige erfolgt, hat nun allerdings den Nachteil, dass die leitende Verbindung an den Stossstellen unterbrochen wird, so dass es erforderlich ist, in diesem Fall eine besondere elektrisch leitende Brücke von Rohr zu Rohr herzustellen.

In allen Fällen, wo es möglich ist, das Rohrsystem zu erden, wird man dies thun, und zwar an möglichst vielen Stellen.

Blanke Leitungen dürfen nur verwendet werden, wenn sie betriebsmässig geerdet sind und als Fahrleitung für elektrische Bahnen. Da in der Regel aber die Strecken so niedrig sind, dass die an der Decke befestigten blanken

Leitungen in Schlagwettergruben.

194.
Isolierte
und blanke
Leitungen.

Genau die gleichen Bestimmungen, die wir für die Verlegung in schlagwetterfreien Gruben erwähnten, haben für solche Anlagen Geltung, welche in Schlagwettergruben installiert werden, jedoch ist es nicht zulässig, isolierte Drahtleitungen offen zu verlegen; dieselben müssen vielmehr durch geerdete Eisen- oder Stahlrohre gegen mechanische Beschädigungen geschützt werden. Im übrigen sind Kabel zu verwenden, deren Verlegung in der gleichen Art zu erfolgen hat, wie vorher beschrieben.

Blanke Leitungen können nur, wenn betriebsmässig geerdet, Verwendung finden; als Fahrdrähte für elektrische Bahnen sind sie unzulässig, da es zur Zeit noch keine Stromabnahmevorrichtung giebt, welche funkenlos arbeitet, so dass beim Bahnbetrieb die Möglichkeit einer Entzündung von Schlagwettern zu nahe liegt. Indessen sind die Bestrebungen der Elektrotechniker und der Bergleute darauf gerichtet, funkensichere Stromabnahmevorrichtungen zu konstruieren, um dem elektrischen Bahnbetrieb auch in Schlagwettergruben Eingang zu verschaffen. Die bisherigen Konstruktionen leiden jedoch an grosser Umständlichkeit, ohne Gewähr für sicheres Funktionieren zu bieten.

Die Verlegung von Leitungen auf Schiffen.

195.
Beginn der
Leitungs-
verlegung.

Mit der Verlegung der Leitungen wird in der Regel sofort nach dem Stapellauf des Schiffes begonnen, da der Umfang der Arbeiten ein sehr grosser zu sein pflegt und nur so die elektrische Anlage rechtzeitig mit der übrigen Einrichtung des Schiffes fertig werden kann. Es sind zunächst die Wege für die Hauptleitungen festzulegen, wobei darauf zu achten ist, dass die Leitungen möglichst hoch liegen müssen, um sie vor mechanischen Beschädigungen zu schützen.

196.
Anordnung
der
Leitungen.

Die Leitungen werden als Hin- und Rückleitungen getrennt verlegt, nur in der Nähe der Komasse, denen man sich übrigens nicht mehr als auf 1 m Entfernung nähern soll, werden die Kabel ganz dicht zusammengelegt, eventuell konzentrische Kabel verwendet. Früher war es allgemein üblich, den Schiffskörper als Rückleitung zu verwenden, jedoch musste man bald davon Abstand nehmen, da Kurz- und Schiffsschlüsse häufig eintraten, auch infolge elektrolytischer Wirkungen Korrosionen am Schiffskörper beobachtet wurden. Neuerdings verwendet man allerdings für Torpedoboote den Schiffskörper bisweilen wiederum als Rückleitung, und zwar ist hier die Gewichtsersparung ausschlaggebend.

197.
Leitungs-
material bei
Schiffs-
montagen.

Ursprünglich wurde für Schiffsmontagen einfaches Gummikabel verwendet, welches in Holzleisten verlegt wurde. Die Nachteile, welche diese Verlegungsart jedoch bot, waren genau die gleichen wie bei den Landanlagen, die auf Seite 257 dieses Bandes beschrieben sind. Hierzu kommt aber noch bei Kriegsschiffen die Gefahr, dass beim Einschlagen von Geschossen die Holzleisten zersplittern und zu gefährlichen Verletzungen führen können. Später wurden für alle Räume, in denen die Leitungen besonderen mechanischen Verletzungen ausgesetzt sind, eisenarmierte Bleikabel verwendet, während in den mit Holz ausgekleideten Kammern die Verlegung mit Holzleisten bei-

werden von oben Schrauben mit versenkten Köpfen eingezogen. Da die Decks meistens mit Linoleum belegt werden, so ist im Laufe der Montage peinlichst darauf zu achten, dass diese Befestigungsschrauben sämtlich vor dem Belegen der Decks eingezogen werden. Die Linoleumleger müssen bei ihren Bohrarbeiten scharf kontrolliert werden, damit sie nicht unter den Decks liegende Leitungen anbohren.

Die Schellen für die Kammern werden aus Messing, die für alle übrigen Räume aus verzinktem Bandeisen hergestellt. Zur Herstellung der gebräuchlichsten Schellen für Kabel von gleichem Durchmesser werden entsprechende Gesenke angefertigt und die Schellen mit einer Presse gebogen und gelocht. Die Schellen für Kabel von verschiedenen Durchmessern müssen von Hand — am besten unter Benutzung kurzer entsprechender Kabelproben — hergestellt werden.

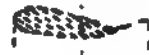


Fig. 347.

Für die Messingschellen der Einzellampenleitungen in den Kammern genügt eine Befestigungsschraube. In allen anderen Räumen dagegen sollen die Schellen für zwei Leitungen — wenn sie nicht ausserordentlich gut geschützt liegen — stets zwei Schrauben erhalten.

200.
Kabel-
schutz.

An Stellen, wo die Kabel über hervorstehende Teile (Winkelisen und dergl.) geführt werden, müssen Bleche gelegt werden, die örtliche Eindrücke verhindern. Folgen solche Teile in kürzeren Zwischenräumen aufeinander, z. B. Spanten, und dürfen diese aus schiffsbautechnischen Gründen nicht durchbohrt werden, so wird ein durchgehendes Blech gelegt, das zur Versteifung am Rande umgebördelt wird, dessen Querschnitt also U-förmig ist.

In den Salons, Wohnräumen und Messen können die Kabel, soweit möglich, unter die Blechverkleidungen der Decksbalken gelegt werden. Die freiliegenden Kabel müssen mit der betreffenden Tapeten- bzw. Deckenfarbe gestrichen werden. Zu diesem Zweck müssen die Kabel, soweit sie auf Tapete liegen, etwas von der Wand zurückgenommen werden. Dem Streichen hat ein mehrmaliges Grundieren mit einer Mischung aus Zinkweiss, Terpentin und Leinöl voranzugehen.

Fig. 350.



Fig. 351.

	Trockene Räume ohne leicht entzündlichen Inhalt § 38	Feuergefährliche Betriebsstätten § 39	Chemische (bedingte explosionsgefährliche) Betriebsstätten u. Lagerräume § 47.	Explosionsgefährliche Betriebsstätten u. Lagerräume § 40	Feuchte Räume § 41
Zulässige maximale Spannung für den betreffenden Raum	In allgemeinen unbeschränkt; in Wohnräumen 600 Volt § 38 b (Hochsp.).	1000 Volt § 39 (Hochsp.).	1000 Volt	Nieder- spannung	Unbeschränkt
Blanke Leitungen BC. Zulässige Spannung: In Betriebsräumen und im Freien unbeschränkt. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 2 u. 159.	Als betriebemässig geerdete Leiter mit Krampen oder Schellen, sonst auf Isolierglocken (Fig. 160) oder Isolatoren nach Fig. 274. Ausserhalb elektr. Betriebsräume nur f. Niedersp. oder als Kontaktleitung bis 1000 Volt. § 28 b (Hochsp.). In bewohnten Räumen nur als geerdeter Leiter erlaubt. § 38 a.	Nur als geerdeter Leiter erlaubt. § 39 d.	Verboten. § 47 b.	Verboten. § 40 c.	Zulässig bis 250 Volt auf Isolatoren u. als geerdete Leiter. Abstand von der Wand! § 41 b. Anstrich!
Gummibandleitungen GB. Zulässig für feste Verlegung in trockenen Räumen bis 250 Volt, zum Anschluss beweglich. Stromverbraucher unzulässig. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 159.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261), auf Klemmen (Fig. 270); in Isolierrohre vgl. Hdb. VI, 2, S. 257 u. ff.	In Isolierrohren. § 39 d.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261). In Isolierrohren, wenn die chemischen Substanzen die offen verlegten Leitungen angreifen. § 47 b. Schutz gegen chem. Einflüsse.	Verboten. § 40 d.	Verboten. § 41 c.
Gummiaderleitungen GA. Zulässige Spannung festverlegt 1000 Volt, zum Anschluss beweglicher Stromverbraucher 500 Volt. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 161.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261), auf Klemmen (Fig. 270). In Isolierrohre jeder Art und in Metallrohre ohne isolierende Auskleidung; bei Hochspannung §§ 17 u. 29 b beachten.	In Rohren jeder Art. § 39 d. Für Hochspannung mit Metallmantel; vgl. Weber, Erklärungen.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261). In Rohre jeder Art, wenn die chem. Substanzen die offen verlegten Leitungen angreifen. § 47 b. Schutz gegen chem. Einflüsse.	In Rohren jeder Art. § 40 d.	Auf Rollen (Fig. 261) bis 250 Volt, auf Isolatoren (Fig. 160) bis 1000 Volt. Für Hochspannung Wandabstände des so gross. In widerstandsfähigen Rohren. § 41 c.
Gummiaderleitungen für Hochspannung SGA. Zulässig für 5000 bzw. 12000 Volt, § 7 d, wenn fest verlegt, zum Anschluss beweglich. Stromverbraucher bis 1500 Volt. § 7 h mit Schutzschlauch. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 167.	Wie Gummiaderleitungen.	Wie Gummiaderleitungen.	Wie für Gummiaderleitungen GA, jedoch nur bis 1000 Volt. § 47 g (Hochsp.).	In Rohren jeder Art. § 40 d.	Nur bis 1000 Volt zulässig. Verlegung wie Gummiaderleitungen GA. § 41 b.
Biegsame Mehrfachleitungen zum Anschluss beweglicher Stromverbraucher. SA bis 500 Volt, MA bis 500 Volt, SMA bis 1500 Volt.	Zulässig.	Für Niederspannung zulässig. § 39 e.	Zulässig bis 1000 Volt. § 47 b, g.	Verboten. § 40 c.	Zulässig mit starke schmiegsamer Ummantlung zum mechanischen Schutz. Niederspannung § 41 b und 1.
Schnurleitungen. Gummibandschnur SB. Fest verlegt zulässig bis 125 Volt, zum Anschluss beweglich. Stromverbraucher unzulässig. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 169.	Nur über Putz zulässig auf Rollen (Fig. 260, 273 c), Klemmen (Fig. 272), Ringen (Fig. 271), in Isolierrohren. § 38 d.	Unzulässig.	Verboten. § 47 b.	Verboten. § 40 c.	Verboten. § 41 c.
Gummiaderschnur SA. Zulässig bis 1000 Volt festverlegt. " " " 500 " z. Anschluss beweglicher Stromverbraucher. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 170.	Auf Rollen (Fig. 261, 273 c), Ringen (Fig. 271), Klemmen (Fig. 272), in Rohren jeder Art.	Nur für Niederspannung und nur als bewegliche Leitung zulässig. § 39 e.	In Räumen mit ätzenden Dünsten, fest verlegt, verboten. Als bewegl. Leitung mit besonderem Schutz auch in diesen Räumen zulässig. § 47 i.	Verboten. § 40 c.	Nur zulässig als beweglicher Leiter mit starker schmiegsamer Ummantlung zum mechanischen Schutz. § 41 c.
Kabel. Zulässige Spannungen: einfache Gleichstromkabel normalisiert 700 Volt, konzentrische Kabel 3000 Volt, versilberte Kabel unbeschränkt. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 171 u. ff.	In jeder Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart. Schutz gegen chem. Einflüsse.	In jeder Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart. Schutz gegen Alkalien.
Bemerkungen.			Feuergefährliche, explosionsgefährliche feuchte und durchtränkte Räume chem. Fabriken sind nach den diesbezügl. §§ zu behandeln.		Schutz gegen Berührung. Die nach teils in Räumen führende Leitungen nicht abschaltbar sein.

Tabelle.

Räume mit brennenden Gasen	Durchdränkte Räume	Theater Bühnenhaus	Bergwerke § 46			
			Schlagwetterfreie Gruben Schächte u. einfallende Strecken von mehr als 45° Neigung	Horizontale u. einfallende Strecken von weniger als 45° Neigung	Schlagwetter-Gruben Schächte u. einfallende Strecken von mehr als 45° Neigung	Horizontale u. einfallende Strecken von weniger als 45° Neigung
2 bzw. 47	§ 43	§ 45				
1000 Volt	Nieder- spannung	Nieder- spannung	Im allgemeinen unbeschränkt. Für Beleuchtung gelten gewisse Beschränkungen z. B. durch einige Bergpolizeivorschriften; Spannungsgrenze 250 Volt.			
Nur bis 250 Volt auf Isolatoren mit leitendem Anstrich.	Zulässig auf Isolatoren (Schutz gegen Berührung) und als geerdeter Leiter. Vgl. § 43 a und 41 b.	Als geerdeter Leiter und im Inneren der Beleuchtungskörper zulässig. § 45 c und § 45 m ⁴ .	Unzulässig.	Nur als Fahrdrabt für elektrische Bahnen und als geerdeter Leiter. § 46 b.	Unzulässig.	Nur als betriebsmäßig geerdeter Leiter zulässig, nicht als Fahrdrabt.
Isolatoren (Fig. 160), Rollen (Fig. 264), überhoben, wenn chemischen Substanzen oder offenen Leitungen angeschlossen. § 47 d. Schutz gegen chem. Einflüsse.	Verboten. § 41 c.	In Isolierrohren mit Metallüberzug. § 45 d.	Unzulässig.	Unzulässig. § 46 c.	Unzulässig.	Unzulässig.
Isolatoren (Fig. 160), Rollen (Fig. 264), über jeder Art, die chemischen Substanzen offen verpackungen angeschlossen. § 47 d. Schutz gegen chem. Einflüsse.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 264). In widerstandsfähigen Rohren. § 41 c.	In Rohren jeder Art. § 45 d.	Unzulässig.	Zulässig f. Niederspannungsisolatoren m. gewissen Beschränkungen bez. der Aufhängenhöhe über d. Sohle. Anstrich od. Verlegung in leitend verbundene möglichst geerdete Eisen- u. Stahlrohre. § 46 c.	Unzulässig.	Nur zulässig in leitend verbundenen möglichst geerdeten Eisen- und Stahlrohren und nur für Niederspannung.
Für Gummiadern nach GA., jedoch bis 1000 Volt.	Nur für Niederspannung zulässig auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 264) in widerstandsfähigen Rohren.	In Rohren jeder Art. § 45 d.	Unzulässig.	Zulässig für Niederspannung auf Isolatoren mit gewissen Beschränkungen bez. der Aufhängenhöhe über der Sohle. Anstrich oder Verlegung in leitend verbundene möglichst geerdete Eisen- und Stahlrohre. § 46.	Unzulässig.	Nur zulässig in leitend verbundenen möglichst geerdeten Eisen- und Stahlrohren und nur für Niederspannung.
Zulässig Schutzhülle.	Zulässig mit starker schmiegsamer Umhüllung zum mechanischen Schutz. §§ 43 a u. 41 d.	Zulässig mit starker schmiegsamer, nicht metallischer Umhüllung zum mechanischen Schutz. § 46 e.	Nur für Ablaufzwecke zulässig bis 500 Volt.	Nur zulässig bis 500 Volt und nur dann, wenn gepanzert. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 169.	Nur für Abtlaufzwecke zulässig bis 500 Volt.	Nur zulässig bis 500 Volt und nur dann, wenn gepanzert.
Verboten.	Verboten. § 41 c.	In Isolierrohren mit Metallüberzug zulässig über Putz. § 45 d.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.
Verlegt verboten.	Nur zulässig als beweglicher Leiter mit starker schmiegsamer Umhüllung zum mechanischen Schutz. § 41 d.	In Rohren jeder Art.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.
Für Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart.	Zulässig m. Armatur aus verzinkten Eisen oder Stahladranten mit event. Schutz gegen chemische Beeinflussungen. Befestigung mit Holzschellen.	Zulässig; bez. der Befestigung siehe § 46 d.	Zulässig m. Armatur aus verzinkten Eisen oder Stahladranten mit event. Schutz gegen chemische Beeinflussungen. Befestigung mit Holzschellen.	Zulässig; bez. der Befestigung siehe § 46 d.
Schutz gegen chemische Einflüsse.	Schutz gegen Berührung. Warnungstafeln. § 43 b.					

Leinöl und Terpentin. Die blanken, stromführenden Teile, mit Ausnahme der Sammel- und Verbindungsschienen an den Schaltbrettern, dürfen nicht gestrichen werden.

Um die einzelnen Stromkreise leicht verfolgen zu können, erhalten die Kabel an den Stellen, wo sie durch Schotte geführt oder hinter Verkleidungen u. s. w. verschwinden, kleine, runde, in der Mitte gelochte Messingschildchen von etwa 30 mm Durchmesser, die am besten auf die nächste Schelle genietet werden. Diese Schildchen tragen ausser der Bezeichnung des Stromkreises den Leitungsquerschnitt und bei Abzweigleitungen noch eine kurze Angabe, wohin sie führen.

Zusammenstellung der Installationsarten.

204.
Installations-
tabelle.

In der vorstehenden Installationstabelle sind die üblichsten Verlegungsarten eingetragen. Für jedes Leitungsmaterial ist die Spannungsgrenze eingetragen, ebenso für jeden Raum; besondere Beschränkungen für gewisse Fälle sind in den einzelnen Rubriken gesondert angegeben. Es ist noch ein Unterschied gemacht, ob ein Material „verboten“ oder „unzulässig“ ist. Ersteres soll andeuten, dass die Sicherheitsvorschriften das betreffende Material ausdrücklich verbieten.

Wo Paragraphen angezogen sind, beziehen sie sich auf die Vorschriften des Verbandes vom 1. Januar 1904.

seien. Wahrscheinlich würde der Beobachter schwer geschädigt worden sein, wenn er plötzlich und unerwartet der hohen Spannung ausgesetzt worden wäre und infolgedessen der Schreck und seine Wirkungen zur Geltung gekommen wären, abgesehen davon, dass er durch das Schuhwerk ziemlich gut gegen Erde isoliert war.

Die ersten Versuche zeigen aber, dass eine verhältnismässig geringe Wechselstromspannung, wie sie für Hausinstallationen üblich ist, eine Gefährdung der Person herbeiführen kann, wenn beide Drähte berührt werden, andererseits zeigt die zweite Versuchsreihe, dass, wenn ein hoher Widerstand, hier durch gutes Schuhwerk gebildet, in den Stromkreis eingeschaltet wird, diese an und für sich gefährlichen Spannungen keine schädlichen Wirkungen hervorrufen.

Die gleichzeitige Berührung zweier Drähte wird selten vorkommen, wenn sie nicht absichtlich herbeigeführt wird, dagegen sind die Fälle überaus häufig, wo eine beabsichtigte oder unbeabsichtigte Berührung eines Poles stattfindet. Für den Fall, dass der nicht berührte Pol einen Erdschluss hat, wird nunmehr ein Strom den Körper durchfliessen, dessen Intensität von der Spannung der Anlage, die eine gegebene Grösse, deren Kapazität und dem durch den Körper und die Berührungsflächen gebildeten Widerstand, abhängig ist.

206.
Widerstand
des
Menschen.

Dieser Widerstand setzt sich nun aus verschiedenen Widerständen zusammen, nämlich aus:

1. dem Widerstand der Person selbst,
2. dem Übergangswiderstand an der Berührungsstelle,
3. dem Übergangswiderstand zwischen dem Körper und Erde,
4. dem Isolationswiderstand des nicht berührten Leiters.

Der Widerstand des menschlichen Körpers beträgt nun nach Messungen, welche im Laboratorium von SIEMENS & HALSKE an Arbeitern vorgenommen wurden,¹⁾ im Mittel etwa 500 Ohm, von Hand zu Hand gemessen, wobei die Hände einen Körper voll umschlossen und die Berührungsfläche zwischen Hand und Körper zu etwa 100 cm² angenommen wurde. Bei einer Berührungsfläche von 1 cm² wurde ein Widerstand von 50000 Ohm ermittelt, worin die Übergangswiderstände enthalten sind.

Bei Messungen zwischen Hand und Fuss bzw. Erde wurden Widerstände gefunden, welche zwischen 900 bis 150000 Ohm schwanken, und zwar sind die Widerstände ganz und gar abhängig vom ständigen Beschäftigungsort der Menschen. Arbeiter, welche in trockenen Betrieben thätig sind, zeigten durchweg einen Widerstand zwischen Hand und Fuss, der 100000 Ohm überstieg. Der Übergangswiderstand erniedrigt sich aber um so mehr, je feuchter die Betriebe sind und wird ganz ungünstig in solchen Arbeitsstätten, in denen Laugen, Säuren u. s. w. verarbeitet werden. In diesen Räumen durchtränken die ätzenden Substanzen nicht nur das Schuhwerk, sondern greifen auch die Haut der Hände derart an, dass der oben erwähnte Hautwiderstand ganz erheblich unter den angegebenen Wert sinkt.

207.
Künstliche
Erhöhung
der Über-
gangs-
widerstände.

Man wird daher bei allen Arbeiten an unter Spannung stehenden Metallteilen und bei der Betriebsführung elektrischer Anlagen bestrebt sein, um einen ausreichenden Schutz zu erlangen, die Übergangswiderstände künstlich zu erhöhen, und zwar erfolgt dies einmal durch die ständige Anordnung von kräftigen Gummidecken oder hölzernen Bedienungsgängen an solchen Stellen,

1) ETZ 1899, S. 602.

weise ist konstatiert worden, dass in den jüngst in Deutschland erbauten Anlagen mit 30 000 Volt keine so schweren Schädigungen der Menschen aufgetreten sind, wie bei den geringeren Spannungen. Es wird dies darauf zurückgeführt, dass in einer bestimmten Entfernung von den Leitungen der Strom dem Menschen entgegen springt und ein Lichtbogen auftritt, dessen Widerstand mildernd wirkt.

209.
Sekundäre
Folgen eines
Schlages.

Auf die indirekten schädlichen Wirkungen elektrischer Schläge kann hier nicht eingegangen werden, es sei nur darauf hingewiesen, dass jeder Arbeiter, der an einer an und für sich gefährlichen Stelle, auf einem Mast, Dach u. s. w. arbeitet und dabei stromführenden Leitungen, selbst wenn sie ganz niedere Spannung führen, nahe kommt, sich so sicher stellen bzw. befestigen muss, dass er nicht herabfallen kann, wenn er infolge eines elektrischen Schlages erschrickt. Diese Fälle sind verhältnismässig häufig und haben in der Regel das Gerücht zur Folge, dass der Verunglückte vom elektrischen Strom erschlagen sei, während die Beschädigung nur die sekundäre Folge eines an und für sich völlig bedeutungslosen Schlages ist.

210.
Schädigung
des Organis-
mus.

Die schädlichen Wirkungen, welche der elektrische Strom auf den menschlichen Organismus ausübt, erstrecken sich in erster Linie auf das Nervensystem, da die Nerven verhältnismässig gut leiten. Durch die Lähmung derselben wird die Lunge in Mitleidenschaft gezogen und gelähmt. Seltener wird durch die Schreckwirkung die Thätigkeit des Herzens beeinflusst.

Die Wiederbelebungsversuche der durch elektrische Schläge Getroffenen beschränken sich daher im wesentlichen auf die Einleitung künstlicher Atmung.

Der Tod kann auch durch starke Erwärmung der Muskeln eintreten, wenn diese sich zusammenkrampfen und dabei eine solche Arbeit leisten, dass sich der Körper erhitzt und die Albumine gerinnen.¹⁾

211.
Versuche an
Tieren.

Prof. Dr. JULIUS KRATTER in Graz berichtete über die Wirkungen elektrischer Ströme auf den tierischen Organismus vor dem XI. internationalen medizinischen Kongress zu Rom am 31. März 1894, und zwar waren als Versuchstiere Kaninchen, Meerschweine und Katzen zur Verwendung gekommen die Wechselspannungen bis zu 2000 Volt ausgesetzt wurden.

Das Versuchsergebnis geben die folgenden Zeilen wieder:

Meist erfolgt der Tod durch die bei Experimenten an Tieren allzeit auftretende plötzliche Hemmung der Atmung, eine Funktionsstörung, die in einem Teile der Fälle auch nach dem Aufhören des Reizes so lange Zeit andauert, bis definitiver Tod durch Erstickung eingetreten ist. Während dieser ist die Herzbewegung noch erhalten. Dauert der Stillstand der Atmung über eine gewisse Zeit (ca. 2 Minuten) an, so tritt, wie bei der mechanischen Erstickung, sekundärer Herzstillstand (Tod) ein. Nicht selten jedoch beginnt das Tier wieder spontan zu atmen und erholt sich in einiger Zeit völlig. Es werden überhaupt Tiere auch durch Ströme von hoher Spannung (1500 — 2000 Volt) nicht sicher und leicht getötet. Die Gefährlichkeit des elektrischen Stromes für eine Tierspecies scheint von der Organisation des zentralen Nervensystems abzuhängen und mit der höheren Entwicklung des Gehirnes in gleichem Masse zuzunehmen. Dadurch würde die Thatsache ihre Erklärung finden, dass Menschen fast ausnahmslos durch Ströme getötet werden, welche Meerschweinchen und Kaninchen auch dann nicht sicher töten, wenn die Elektroden am Kopfe angelegt werden.

1) Lumière Electrique Bd. 44, S. 103.

mit den Leitungsdrähten in leitende Verbindung bringt. Anderenfalls ist zunächst diejenige Leitung zu erden, an der sich der Verunglückte befindet (vgl. 4).

- d) Beim Erden ist der dazu benutzte Draht (die Eisenstange u. dergl.) zuerst mit der Erde (dem eisernen Maste u. s. w.), dann mit der Leitung in Berührung zu bringen.

II. Verbrennungen.

1. Bei blosser Rötung und Schmerz kühle man durch kaltes Wasser (Wasserleitung) oder Eis, lege einen Verband mit Watte an, die in Brandliniment getaucht ist und befestige darüber eine Binde.

2. Bei Blasenbildung sind die Blasen nicht abzureissen und nicht aufzustechen. Bei etwaigem Auslaufen der Flüssigkeit ist eine vierfache Lage von sterilisierter Gaze und darüber Watte und eine Binde zu legen. (Vor dem Abschneiden der Gaze sind die Hände auf das sorgfältigste in Wasser und hierauf in Sublimatlösung 1:1000 zu waschen.)

3. Bei Verkohlungen und Schorfbildungen ist eine vierfache Lage von sterilisierter Gaze, darauf Watte und Binde zu legen.

III. Bewusstlosigkeit.

1. Alle den Körper beengenden Kleidungsstücke (Hemdkragen, Beinkleider) sind zu öffnen. Man lege den Körper auf den Rücken und bringe ein Polster aus zusammengelegten Kleidungsstücken unter die Schultern, damit der Kopf niedriger liegt.

2. Man suche hierauf künstliche Atmung hervorzurufen, wie dieses bei Ertrunkenen geschieht. Man kniee am Kopf des Verletzten nieder (das Gesicht ihm zugewandt), ergreife beide Arme unterhalb der Ellbogen und ziehe sie kräftig im Bogen über den Kopf, so dass sie beinahe zusammenkommen (Einatmung). In dieser Stellung sind die Arme 2 bis 3 Sekunden festzuhalten und alsdann auf demselben Wege zurückzuführen und kräftig gegen die Seiten des Brustkastens zu drücken, um die Luft aus den Lungen herauszutreiben (Ausatmung).

3. Dieses Verfahren wird etwa 16 mal in der Minute wiederholt, sofern die Atmung nicht früher wiederkehrt.

4. Sind zwei Helfer zur Hand, so fasse während dieser Versuche ein zweiter die Zunge des Verletzten mit einem Taschentuch, ziehe sie kräftig heraus, so oft die Arme über den Kopf gezogen werden und lasse sie zurückgehen, wenn die Arme zur Brust geführt werden (also genau so oft, wie das Umlegen der Arme). Wenn der Mund nicht aufgeht, öffne man ihn gewaltsam mit Holz oder dem Griff eines Taschenmessers.

5. Sind noch mehrere Helfer zur Hand, so sind die unter 1-3 aufgeführten Versuche von zweien auszuführen, indem jeder einen Arm ergreift und auf das Kommando 1, 2—3, 4 machen beide gleichzeitig diese Bewegungen oder lösen sich gegenseitig, wenn einer müde, ab.

6. Es ist zwecklos und unratsam, geistige Getränke in den Mund zu giessen. Dagegen empfiehlt es sich, den Körper kräftig zu frottieren.

Unter allen Umständen ist sofort nach einem Arzt zu senden.

Abteilung II umfasst dann alle Anlagen, welche mit einer höheren als der vorstehend angegebenen betrieben werden.¹⁾

Von den Regierungen und Behörden sind diese Vorschriften als massgebend anerkannt worden und dementsprechend ist ihre Einführung sehr schnell erfolgt.²⁾

Die Vorschriften der Feuerversicherungs-Gesellschaften sind neben den Verbandsvorschriften bestehen geblieben und sind für die Besitzer elektrischer Anlagen von grösstem Interesse, da ihre Befolgung in den Policen gefordert und Verstösse dagegen unter Umständen zur Verweigerung der Entschädigung im Schadenfalle führen kann. Da sie weit weniger bekannt sind als die Sicherheitsvorschriften des Verbandes, so seien sie hier wiedergegeben und gleichzeitig auch die Anweisung der Gesellschaften für das Betriebspersonal, damit die Anlagen dauernd sachgemäss unterhalten werden.

Vorsichtsbedingungen für elektrische Licht- und Kraftanlagen.

215.
Vorsichts-
bedingungen
der Feuer-
versiche-
rungs-
Gesell-
schaften.

Die nachstehenden Bedingungen gelten für Anlagen in Räumen jeder Art. Für elektrische Installationen auf Theaterbühnen und in Schaufenstern von Warengeschäften sowie für Räume, in welchen leicht entzündliche Gegenstände in grösseren Mengen aufgestapelt werden, bleiben ausserdem besondere Zusatzbestimmungen für den Einzelfall vorbehalten.³⁾

I. Elektrische Betriebsräume.

1. a) Elektrische Betriebsräume müssen unter der Aufsicht von instruiertem Betriebspersonale stehen oder, soweit die Abwesenheit des Betriebspersonals statthaft ist, für Unbefugte unzugänglich sein.
- b) In elektrischen Betriebsräumen dürfen brennbare Gegenstände nur unter Verschluss oder mit geeignetem Schutze oder in solcher Entfernung von den elektrischen Maschinen, Instrumenten,

1) a) Vorschriften für Deutschland.

Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen:

I. Niederspannung,

II. Hochspannung.

Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Starkstromanlagen. Herausgegeben vom Verband Deutscher Elektrotechniker. Verlag von JUL. SPRINGER, Berlin.

Wichtig sind die im Auftrage des V. D. E. von Dr. C. L. WEBER herausgegebenen trefflichen Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften. Verlag von JUL. SPRINGER, Berlin.

b) Vorschriften für ausserdeutsche Staaten.

Frankreich: ETZ 1898, S. 706; 1895, S. 647 (Pariser Stadtverwaltung).

Russland: ETZ 1898, S. 862.

Schweiz: ETZ 1900, S. 174, 201, 219, 359; 1897, S. 150. Schweizerisches Bundesgesetz betr. die elektrischen Schwach- und Starkstromanlagen vom 24. 6. 02. — ETZ 1903, S. 12.

England: ETZ 1897, S. 640; 1898, S. 388 für Hochspannung; 1897, S. 439 für Centralen.

Südafrika: ETZ 1903, S. 373.

Österreich: Vorschriften des elektrotechnischen Vereins in Wien.

2) Vgl. ETZ 1896, S. 456; 1897, S. 391; 1898, S. 711; 1899, S. 561; 1902, S. 732.

3) Diese Sonderbestimmungen sind bisher nicht erlassen.

9. In Räumen mit ätzenden Dünsten sind nur Kabel und blanke Leitungen zu verwenden. Je nach der Art der Dünste sind Kabel und Leitungen gegen chemische Angriffe zu schützen.

10. Freileitungen sind den örtlichen Verhältnissen entsprechend durch Blitzschutzvorrichtungen, welche auch bei wiederholten Entladungen wirksam bleiben, zu schützen.

11. a) Schnurpendel mit biegsamer Leitungsschnur sind nur dann zulässig, wenn das Gewicht der Lampe nebst Schirm von einer besonderen Tragschnur getragen wird, welche mit der Schnur verflochten sein kann. An der Aufhängestelle und an der Fassung müssen die Leitungsdrähte länger sein als die Tragschnur, so dass kein Zug auf die Verbindungsstellen ausgeübt wird.
- b) Zuleitungsdrähte von Bogenlampen, welche als Aufhängenvorrichtung dienen sollen, dürfen ausserdem nicht verdreht werden.
- c) Im übrigen dürfen Leitungen nicht zur Aufhängung von Lampen oder sonstigen Gegenständen benützt werden.
- d) Beleuchtungskörper müssen so angebracht sein, dass die Zuführungsdrähte nicht durch Drehen des Beleuchtungskörpers auf Zug beansprucht oder verletzt werden können.
12. a) Verbindungen zwischen zwei Leitungen müssen verschraubt oder verlötet oder auf gleichwertige Weise ausgeführt sein. Die Verbindungsstellen sind bei isolierten Leitungen der Isolierung der Leitung gleichwertig zu isolieren.
- b) Mehrfachschnurleiter dürfen nur durch Abzweigmuffen auf isolierender Unterlage an Leitungen angeschlossen werden.
- c) Leitungen für bewegliche Verbrauchsvorrichtungen müssen mittels lösbarer Kontakte (Steckkontakte u. s. w.) an die Leitungen angeschlossen werden.
- d) Verbindungen zwischen Leitungen und Apparaten dürfen nur durch Verschraubung, soweit erforderlich unter Verwendung von Kabelschuhen, hergestellt sein.
- e) Abzweig- und Verbindungsstellen müssen durch feste Unterstützungen von Zug entlastet sein.
13. a) Leitungen dürfen nur so stark mit Strom belastet werden, dass eine für das Handgefühl erhebliche Erwärmung derselben vermieden wird.
- b) Der geringste zulässige Querschnitt ist bei isolierten Leitungen 1 mm^2 , an und in Beleuchtungskörpern $\frac{3}{4} \text{ mm}^2$, bei blanken Leitungen in Gebäuden 4 mm^2 , bei Freileitungen 6 mm^2 für Niederspannung und 10 mm^2 für Hochspannung.
- c) Bei Gleichstromdreileitersystemen für Niederspannung muss der neutrale Mittelleiter geerdet sein.

IV. Sicherungen.

14. a) Die neutralen oder Nullleitungen bei Mehrleiter- oder Mehrphasensystemen sowie alle betriebsmässig geerdeten Leitungen dürfen keine Sicherungen enthalten.

- b) Alle übrigen Leitungen müssen von der Maschinenschalttafel ab durch Schmelzsicherungen oder andere gleichwertige selbsttätige Stromunterbrecher geschützt werden.
- c) Mehrere Verteilungsleitungen dürfen durch eine gemeinsame Sicherung von höchstens 6 Amp. Normalstromstärke geschützt werden, wobei Querschnittsverminderungen und Abzweigungen jenseits dieser Sicherung nicht weiter gesichert zu werden brauchen.

Bei grossen Beleuchtungskörpern können nach eingeholter Genehmigung der Versicherungsgesellschaft ausnahmsweise gemeinsame Sicherungen für bis 12 Amp. bei bis 130 Volt zugelassen werden.

- d) Lösbare Kontakte müssen ohne Ausnahme auf der Seite des festen Teiles allpolig gesichert sein.
 - e) Im übrigen sind Sicherungen an allen Stellen anzubringen, wo sich der Querschnitt in der Richtung nach der Verbrauchsstelle hin vermindert; jedoch sind bei Querschnittverkleinerungen, wo die vorhergehende Sicherung die schwächeren Querschnitte schützt, weitere Sicherungen nicht mehr erforderlich.
 - f) Das Anschlussleistungsstück von der Hauptleitung zur Sicherung darf nur, wenn seine einfache Länge nicht mehr als 1 m beträgt, von geringerem Querschnitte sein als die Hauptleitung und darf, wenn von geringerem Querschnitte, nicht aus Mehrfachleitern bestehen.
15. a) Die Sicherung ist der Betriebsstromstärke der zu schützenden Leitung anzupassen.
- b) Die Abschmelzstromstärke bzw. Ausschaltstromstärke soll das Doppelte ihrer Normalstromstärke sein.
 - c) Schmelzsicherungen dürfen beim Abschmelzen keinen dauernden Lichtbogen erzeugen und keine gefährlichen Explosionserscheinungen hervorrufen.
 - d) Schmelzstücke aus plastischem Metall müssen in Kontaktstücke aus Kupfer oder gleich geeignetem Metall eingelötet sein.
 - e) Die Normalstromstärke und die Maximalspannung muss auf dem Schmelzeinsatze verzeichnet sein.
 - f) Sicherungen bis 30 Amp. müssen so eingerichtet sein, dass eine fahrlässige oder irrtümliche Verwendung zu starker Schmelzeinsätze vermieden wird.

V. Lampen.

16. Glühlampen, welche mit entzündlichen Stoffen in Berührung kommen können, müssen mit Schalen, Glocken oder Drahtgittern so versehen sein, dass die Berührung der Lampen mit entzündlichen Stoffen verhindert wird.

17. In Räumen, in welchen explosible Stoffe verarbeitet oder gelagert werden, oder in welchen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden oder anhäufen können, müssen Glühlampen mit dicht schliessenden Überglocken, welche auch die Fassungen einschliessen,

versehen sein. In solchen Räumen deren glühender Teil in einem luft jede andere Lampenart ist verboten:

18. a) Bogenlampen müssen 1
das Herausfallen glühe
- b) In Räumen, welche 1
müssen die Aschentell
aus Metall bestehen un

VI.

Die in den Absätzen 3a, .
Art und die Verwendung der
in Bezug auf die Art und
hierbei in Betracht kommend
lich, nachträglich erfüllt we
einer solchen Änderung wie
arbeiten dürfen dabei nur
werden, als dasselbe mit
beiten vertraut ist.

VI

19. a) Neuanla:
betriebsetz
sind dure'
alljährlic
schriftlic
verabre
festzus'
nügt:
licher
Ände

ges-

- b) Be

w

,

Anweisu

210. Zi
Betriebsan- struier
weisung der per'so
Feuerver-
sicherungs-
gesell-
schaften. nur

Zu 12d. Es ist verboten, Leitungen an Apparate anders als durch Verschraubung anzuschliessen.

Zu 14b. Es ist verboten, Leitungen in Betrieb zu nehmen, welche nicht ordnungsmässig mit Sicherungen versehen sind.

Zu 15f. Es ist dem Betriebspersonale auf das strengste verboten, eine infolge von Fehlern der Installation durchgeschmolzene Sicherung durch eine stärkere zu ersetzen. Ist eine Sicherung geschmolzen, so muss der Fehler in der Leitung oder in dem Verbrauchsapparate, welcher das Schmelzen der Sicherung bewirkt hat, festgestellt und beseitigt werden. Solange neue Sicherungen von gleicher Stärke wie die alten wieder durchschmelzen, ist der Fehler noch nicht beseitigt, und vor der Beseitigung desselben darf die fehlerhafte Leitung nicht betrieben werden.

Zu 16. Schalen, Glocken, Drahtgitter, welche dazu bestimmt sind, Glühlampen vor entzündlichen Stoffen zu schützen, dürfen während des Gebrauches dieser Glühlampen nicht abgenommen werden.

Zu 17. In Räumen, in welchen explosible Stoffe verarbeitet oder gelagert werden, oder in welchen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden oder anhäufen können, dürfen Glühlampen unter keinen Umständen ohne die vorgeschriebenen luft- und staubdichten Glocken eingeschaltet sein. Wird eine solche Schutzglocke beschädigt, dann muss die betreffende Glühlampe so lange ausgeschaltet bleiben, bis sie wieder mit einer solchen Schutzglocke versehen ist. Hat man in solchen Räumen Glühlampen auszuwechseln, dann muss die Lampenleitung so lange ausgeschaltet bleiben, bis die Schutzglocke wieder ordnungsmässig aufgesetzt ist. Es ist strengstens verboten, in solchen Räumen andere Lampen als die hier bezeichneten zu verwenden.

Zu 18. Beschädigte Glocken und Aschenteller an Bogenlampen sind sofort zu ersetzen. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass stets passende Glocken und Aschenteller zum Ersatz vorhanden sind. In Räumen, in welchen entzündliche Gegenstände sich befinden, dürfen andere als genau passende Aschenteller nicht verwendet werden und hier dürfen Reparaturen oder irgend welche Arbeiten an Bogenlampen während des Betriebes der Lampen bei abgenommenen Glocken oder Aschentellern nicht vorgenommen werden.

Zu 19. Reparaturen, Veränderungen und Erweiterungen an bestehenden Anlagen dürfen nur insoweit von dem Betriebspersonale ausgeführt werden, als dasselbe mit der bedingungsmässigen Ausführung solcher Arbeiten vertraut ist.

Isolationsfehler und deren Entstehung.

Wir haben nun zu unterscheiden zwischen solchen Massnahmen, welche erforderlich sind, um eine Feuersgefahr zu vermeiden und solchen, welche die mit der Anlage oder ihren einzelnen Teilen in Berührung kommenden Menschen gegen körperliche Schäden schützen sollen. Die Anlagen müssen aber ferner auch so ausgeführt werden, dass eine weitgehende Betriebssicherheit gewährleistet wird. Wir wollen zunächst die persönliche Sicherheit weiter im Auge behalten.

217. Zunächst ist es, wie an anderer Stelle des näheren auseinandergesetzt, dringend erforderlich, den Isolationszustand zu überwachen und in dauernd gutem Zustande zu erhalten. Die Überwachung erfolgt durch regelmässig

seine Elastizität, so dass, da die meisten Leitungen, sei es durch Schwingungen ihrer Befestigungsstellen, sei es durch Temperaturveränderungen, kleine Bewegungen machen, kleine Risse und Brüche auftreten, in welche Feuchtigkeit eindringen und das Zerstörungswerk schneller vollenden kann. Treten chemische Einflüsse auf, so kann unter ungünstigen, allerdings sehr häufig beobachteten Umständen die Zerstörung der Isolierung so schnell vor sich gehen, dass schon nach wenigen Monaten eine Erneuerung der Leitungen vorgenommen werden muss.

Die Isolierkörper (Rollen, Isolatoren), auf denen die Leitungen verlegt sind, beschlagen mit leitenden Flüssigkeiten, die sich auch in feinen Rissen derselben festsetzen und dem Strom einen bequemen Weg bieten. Je höher die Betriebsspannung, um so mehr muss darauf geachtet werden, dass die Oberflächenleitung vermieden wird.

Alle diese Umstände führen zu einer Entweichung des Stromes und auf diesem Wege thut er selbst das übrige, um den Fehler zu vergrössern, so dass schliesslich unter Durchbrechung der Isolation eine Verbindung des Leiters mit der Erde oder mit dem Leiter anderen Potentials hergestellt wird.

220.
Auftreten
von Fehlern.

Wenn nun an irgend einer Stelle im Netz ein Fehler auftritt und wir annehmen wollen, dass wir es mit einem — praktisch allerdings unmöglichen — absolut isolierten Netz zu thun haben, so würde an dieser Stelle ein Stromübergang nicht stattfinden können; der betreffende Punkt nimmt ja das Potential der Erde an. Praktisch wird auch jede Fehlerstelle einen Strom durchlassen, dessen Höhe grösser oder kleiner sein wird, je nachdem der übrige Teil des Netzes isoliert ist. Befindet sich dessen Isolationszustand in guter Verfassung, so hätte ein Fehler zunächst noch nichts zu sagen, denn es kann ja kein Strom zur Erde abfliessen, ohne an irgend einer Stelle zum Netz zurückzukehren, oder der Strom wird so gering sein, dass er zunächst Schaden nicht anrichten kann.

Wenn zwei gleichgrosse Fehler vorhanden sind, wird der Strom an beiden nahezu die gleiche Stärke haben und im Gleichstromnetz wird an der einen Stelle der Strom austreten, die Spannung also positiv sein, an der anderen Stelle zum Netz zurückkehren und hier die Spannung negativ sein.

Sind dagegen viele Fehler vorhanden, die nicht allzu klein und annähernd von derselben Grössenordnung sind, so wird sich bei der Fehlerortsbestimmung am gesamten Netz ein resultierender Fehler zeigen, der etwa in der Mitte des Stromkreises liegt.

Bildet sich ein grosser Fehler aus und treten gleichzeitig eine Reihe kleinerer auf, so ist die Summe der von diesen ausgehenden Strömen gleich demjenigen, welcher an der Fehlerstelle von geringem Widerstand herrscht. Die Fehlerortsbestimmung wird einen Ort festlegen, der in die Nähe des groben Fehlers fällt.

Bei dem Durchgange des Stromes durch die Flüssigkeiten findet eine Zersetzung derselben statt, der freiwerdende Sauerstoff wirkt oxydierend auf den Leiter und bewirkt somit, dass sich der Fehler verringert, da Metalloxyde nicht leiten. Aus diesem Grunde legen wir bei Isolationsmessungen mit Gleichstrom den negativen Pol der Stromquelle an Erde, so dass die an der Fehlerstelle infolge elektrolytischer Vorgänge auftretenden Salze zerstört und der Fehler somit freigelegt wird. Um dem Strom Zeit zu lassen, diesen Einfluss auszuüben, soll er mindestens zwei Minuten gewirkt haben, ehe die Messung vorgenommen wird.

auch nicht ohne weiteres gefunden werden und es wird erforderlich, automatische Melder einzurichten, die in Thätigkeit treten, sobald an irgend einer Stelle Isolationsfehler auftreten. Um dies zu ermöglichen, wird eine besondere Stromquelle von niedriger Spannung so angeschlossen, dass der eine Pol mit dem Aussenleiter des Kabels oder, wenn derselbe geerdet ist, mit der Erde verbunden wird, während die Prüfdrähte über besondere Klappen-

Fig. 352.

apparate hinweg mit dem anderen Pol verbunden werden. Infolge irgend eines Defektes zwischen den äusseren Leitern und den Prüfdrähten, der jedenfalls bei grösseren Isolationsfehlern auftreten wird, findet ein Stromschluss statt, der die entsprechende Klappe in der Centrale in Thätigkeit setzt. Eine derartige Einrichtung hat die Internationale Elektrizitätsgesellschaft in Wien¹⁾ verwendet. In dem Schaltungsschema Fig. 352 führen die Prüfdrähte *a, b, c, d* u. s. w., wenn sie aus den Endverschlüssen austreten,

1) Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1900, S. 162.

Kurzschlussstrom ein rasches Abschalten des kranken Teiles. Kurzschlüsse treten am häufigsten in Schaltanlagen offen auf, wo sie sofort entdeckt werden können, da zumeist Bedienungspersonal zugegen ist. Indessen können durch leitende Adern in den aus Schiefer oder Marmor bestehenden Platten der Schalttafeln beträchtliche Stromübergänge zwischen den Leitern stattfinden, ohne dass es immer leicht ist, den Fehler, der sich meistens nur durch unsichere Anzeichen bemerkbar macht, zu entdecken. Auch Oberflächenleitung kann an Schalttafeln in starkem Masse auftreten, wenn die Platten nicht allseitig poliert sind und sich an der rauhen Fläche Feuchtigkeit niederschlagen kann.

Erwähnt seien noch die Kurzschlüsse, die infolge von Resonanzerscheinungen auftreten und an anderer Stelle eingehend behandelt sind.¹⁾

222.
Erdschluss.

Der Stromübergang von einem Leiter zur Erde, der Erdschluss, ist eines der häufigsten Übel in einer Anlage. In Kabelnetzen, die an und für sich vorzüglich isoliert sind, tritt er infolge mechanischer Verletzungen, Pickenhiebe u. s. w. auf. In Bergwerken können die Gesteinsverschiebungen starke Schädigungen hervorrufen, die auch dann nicht ganz unmöglich werden, wenn die Kabel beweglich aufgehängt werden, damit sie den Verschiebungen folgen können. An den Einführungsstellen von Kabelkästen, Muffen u. s. w. kann durch Undichtigkeiten Wasser eindringen und zum Erdschluss führen, ganz abgesehen von den Fällen, wo infolge eines Fabrikationsfehlers der Bleimantel porös und durchlässig ist. Die infolge der Fabrikationsart hygroskopische, unter dem Bleimantel liegende Isolierschicht aus Faserstoff nimmt dann die Feuchtigkeit begierig auf und dringt sehr weit im Kabel vor, hier weit ab von der eigentlichen Fehlerstelle neue Fehler bildend.

In Freileitungen und Hausinstallationen sind Erdschlüsse weniger häufig; in ersteren infolge der Wahl besserer Isolierkörper und der wesentlich geringeren Zahl der Befestigungsstellen, in letzteren infolge der meist trockenen Beschaffenheit der Räume.

Dagegen sind in Fabriken und Akkumulatorenräumen Erdschlüsse häufig. In den ersteren hängt dies eng mit den betriebenen Fabrikationen zusammen, nicht zum mindesten trägt aber hier auch die häufig sehr schlechte und einem Laien überlassene Wartung der Anlage das Ihrige dazu bei.

223.
Leitungs-
brüche.

Die dritte Art der Fehler, die Unterbrechung, kann einmal durch den Bruch einer Leitung und durch die Lösung einer Verbindungsstelle entstehen. Der erste Fall tritt verhältnismässig selten ein und meistens nur in Freileitungen bei Stangenbrüchen oder Rauhreif, da die Querschnitte und die Entfernung der einzelnen Befestigungsstellen voneinander im übrigen so gewählt werden, dass zu grosse Belastungen kaum auftreten können.

Lösung von Verbindungsstellen tritt ein, wenn Löt- oder Schraubstellen auf Zug beansprucht werden, auch werden wohl ab und zu die Verbindungsstellen in unterirdisch verlegten Kabelnetzen dadurch auseinandergerissen, dass aus irgend einer Ursache, vielleicht durch den Transport sehr schwerer Wagen, auf die eine Seite des Kabels ein starker Zug ausgeübt wird.

224.
Zulässiger
Isolations-
widerstand.

Es ist daher nicht nur erforderlich, während des Baues und vor der Inbetriebsetzung einer Anlage ihren Isolationswiderstand zu prüfen, sondern man muss ihn dauernd kontrollieren und auftretende Fehler sofort beseitigen, wenn nicht grössere Zerstörungen auftreten sollen.

1) Hdb. VI, 1: Schutzvorrichtungen gegen atmosphärische Entladungen.

Die Berliner Elektrizitätswerke legten zu gleicher Zeit die Anzahl der angeschlossenen Glühlampen oder deren Äquivalente zu Grunde und berechneten den Isolationswiderstand nach der Formel:

$$W = 10000 + \frac{2000000}{n} \text{ Ohm,}$$

worin n die der Anzahl der Glühlampen, einschliesslich eines Äquivalentes von 10 Glühlampen für jede Bogenlampe und jeden Elektromotor, darstellt.

Die gleiche Art für die Bestimmung des minimalen Isolationswertes verwendeten die meisten Elektrizitätswerke, nur waren die Zahlenwerte sehr verschieden, z. B. Köln $\frac{1000000}{n}$, Königsberg $\frac{5000000}{n}$ Ohm.

Es herrschten somit bezüglich der zu verlangenden Isolationswiderstände die verschiedensten Ansichten, die erst dann einige Übereinstimmung erreichten, als der Verband Deutscher Elektrotechniker in seinen Sicherheitsvorschriften 1896 eine einheitliche Grundlage schuf. Nach diesen galt bis Ende 1902 für die Bestimmung des Isolationswiderstandes¹⁾ für Spannungen bis 250 Volt für Hauptleitungen $\frac{1000000}{n}$ Ohm, für jede Hauptabzweigung $10000 + \frac{1000000}{n}$ Ohm, für Spannungen von 250 bis 1000 Volt²⁾ für Hauptleitungen $\frac{3000000}{n}$ Ohm, für jeden Hauptabzweig $10000 + \frac{3000000}{n}$ Ohm.

Alle diese Vorschriften litten an einem beträchtlichen Mangel, sie nahmen zu wenig Rücksicht auf die jeweilige Betriebsspannung, von deren Höhe auch die Stromverluste abhängen. Solange die Anlagen ausschliesslich mit 110 Volt betrieben wurden, war dies auch unbedenklich, da dann die verlangten Isolationswerte genügten. Das Bedürfnis nach höheren Werten wurde aber sofort dringend, als man dazu überging, sehr viele Beleuchtungsanlagen mit der doppelten der früher üblichen Lampenspannung und Kraftübertragungen mit dem Hundertfachen dieses Wertes zu betreiben.

Die Berechnung des Isolationswiderstandes unter Zugrundelegung der angeschlossenen Glühlampen konnte schliesslich auch darum zu keinem günstigen Resultat führen, da für jede Bogenlampe und für jeden Motor, sei er nun 2- oder 200 pferdig, ein willkürlich angenommenes Äquivalent von 10 Glühlampen eingesetzt wurde.

Es mussten somit, hauptsächlich im Hinblick auf die durch die Verwendung höherer Betriebsspannungen bedingten Verhältnisse, höhere und in Abhängigkeit von diesen stehende Grundlagen für die Bemessung der zulässig niedrigsten Isolationswerte geschaffen werden.

Diesem Umstande tragen die vom 1. Januar 1903 gültigen Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker Rechnung.³⁾ In § 2d wird verlangt, dass der Isolationszustand einer Anlage derart sein soll, dass der Stromverlust auf jeder Teilstrecke zwischen zwei Sicherungen oder hinter der letzten Sicherung bei der Betriebsspannung ein Milliampere nicht überschreitet. Der Isolationswert einer derartigen Leitungsstrecke muss hiernach

1) Sicherheitsvorschriften für elektrische Starkstromanlagen, Berlin 1899, § 17, S. 21.

2) Sicherheitsvorschriften für elektrische Mittelspannungsanlagen, Berlin 1900, § 24, S. 25.

3) Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen, Berlin 1902, ETZ 1903, S. 141.

Tabelle No. 16.

Anzahl der Glühlampen bzw. deren Äquivalent		Elektrizitätswerke			Verband Deutscher Elektrotechniker					Schweizer Elektrotechn. Verein			Elektrotechn. Verein Wien (in die russischen Vorschriften übernommen)				Amerika National Elect. Code	
		Berlin	Frank- furt a. M.	Hannover, Barmen	Königs- berg	1896	1900	1903	1903	gegen Erde	Leiter gegen Leiter	gegen Erde	Leiter gegen Leiter	1891 bis jetzt				
														110	220	500		10000
Für Spannungen bis		1895	1895	1894	1893	250	1000	110	220	250	über 250			110	220	500	10000	
Grundlage für die Berechnung		200000 7½	pro 1000 m verlegte Leitung Ohm 100000 60000 Minimalwert Ohm 50000 1 30000			5000000 7½	1000000 7½	Hier ist angenom- men, dass die Lam- pen an einer Ver- teilungsleitung liegen, so dass für etwa 10 Lampen ein Verlust von 0,001 Amp. auftritt		1000000 7½	2000000 7½	3000000 7½	6000000 7½	5000 $\frac{E}{J}$ pro Glühlampe 0,5 A. pro Glühlampe 0,25 A. pro Glühlampe 0,5 Amp.				fest an- gegebene Werte
5		400000	650000	400000	1000000	200000	400000	110000	220000	200000	400000	600000	1,2 × 10 ⁶	220000	880000	10 ⁶	20 × 10 ⁶	4 × 10 ⁶
10		200000	330000	200000	500000	100000	200000	110000	220000	100000	200000	300000	600000	110000	440000	500000	10 × 10 ⁶	2 × 10 ⁶
25		80000	130000	80000	200000	40000	80000	35000	70000	40000	80000	120000	240000	44000	176000	200000	4 × 10 ⁶	800000
50		40000	65000	40000	100000	20000	40000	22000	44000	20000	40000	60000	120000	22000	88000	100000	2 × 10 ⁶	400000
100		20000	50000	30000	50000	10000	20000	11000	22000	10000	20000	30000	60000	11000	44000	50000	10 ⁶	200000
500		4000	50000	30000	10000	2000	4000			2000	4000	6000	12000	2200	8800	10000	200000	25000
1000		2000	50000	30000	5000	1000	2000			1000	2000	3000	6000	1100	4400	5000	100000	25000
1500		1350	50000	30000	3350	650	1300			650	1300	2000	4000	750	3000	3300		12500

einer durchtränkten annehmen, für die dann wesentlich schärfere Bestimmungen in Kraft treten. Ausserdem leiden dann die Isoliermaterialien mehr und werden um so schneller zerstört.

226.
Der
Isolations-
widerstand
von Frei-
leitungen.

Auch für Freileitungen ist es schwierig, einen dauernd guten Isolationswiderstand zu erhalten. Hier kommen nicht nur die Witterungseinflüsse in Frage, sondern auch die Verschmutzung der Isolatoren durch die hauptsächlich in Fabrikgegenden in der Luft enthaltenen Verunreinigungen. Während in der Regel Niederschläge den Isolationswiderstand ungünstig zu beeinflussen pflegen, kann in solchen Gegenden starker Regen zur Erhöhung desselben beitragen, da er die Isolatoren reinigt.

Häufige Isolationsfehler in Freileitungsnetzen rühren von zerbrochenen Isolatoren her, deren Defekte in mutwilligen Steinwürfen und Schüssen ihre Ursache haben können, für die die weissen Isolatoren eine gute Zielscheibe abgeben. Durch die Verwendung matt gefärbter Isolatoren, braun und grün, kann diesem, für den Betrieb überaus unangenehmen Unfug sehr gesteuert werden.

Für Spannungen bis 250 Volt muss der Isolationswiderstand für das Kilometer einfacher Länge bei feuchtem Wetter mindesten 20 000 Ohm, bei höheren Spannungen mindestens 80 Ohm für das Volt und das Kilometer einfacher Länge betragen, braucht aber $1\frac{1}{2}$ Megohm nicht zu überschreiten.

Tabelle No. 17.

Isolationswiderstand von Freileitungen	
bei Spannungen bis	für das Kilometer einfacher Drahtlänge
250 Volt	20 000 Ohm
500 "	40 000 "
1000 "	80 000 "
2000 "	160 000 "
5000 "	400 000 "
10 000 "	800 000 "
über 20 000 "	1 500 000 "

227.
Prüfung
einer An-
lage nach
Fertig-
stellung
und wäh-
rend des
Betriebes.

Vor Inbetriebsetzung einer Anlage muss sie geprüft werden, um festzustellen, ob Isolationsfehler vorhanden sind.¹⁾ Diese Messungen haben sich einmal auf die Messungen des Isolationswiderstandes gegen Erde zu erstrecken, zum anderen muss aber auch festgestellt werden, dass zwischen zwei Leitern verschiedenen Potentials keine Fehlerstellen bestehen. Zur letzteren Messung ist es erforderlich, dass alle Glühlampen, Bogenlampen, Motore, überhaupt alle Stromverbraucher von ihren Leitungen abgetrennt sind, dagegen alle Beleuchtungskörper, einschliesslich deren Fassungen angeschlossen, alle Sicherungen eingesetzt und alle Schalter geschlossen sind. Reihenstromkreise dürfen jedoch nur an einer einzigen Stelle geöffnet werden, die möglichst nahe der Mitte zu wählen ist.

Ordnungsmässig betriebene Anlagen müssen häufig auf ihren Isolationswiderstand geprüft werden. Diese Messungen müssen in ein nur diesem Zwecke dienendes Buch eingetragen werden, da es nicht nur erforderlich

1) Über die Art der Messungen und die erforderlichen Instrumente vgl. Hdb. II.

rotierenden Bürsten einen starken Luftstrom schleudert, der etwa entstehende Funken sicher unterdrückt.

Mit dieser Maschine wird die Isolation der Fernleitung St. Maurice-Lausanne geprüft, deren Länge 56 km beträgt. Die Leitungen, welche einen Querschnitt von 150 qmm und einen Gesamtwiderstand von 13,3 Ohm besitzen, sind auf 1500 hölzernen Masten verlegt. Die Isolatoren haben zwei Mäntel, sie sind von RICCARDO GINOVI in Mailand geliefert.

Zur Messung wird ein statisches Voltmeter und ein Milliampereometer von HARTMANN & BRAUN verwendet. Der eine der Leiter wird an Erde gelegt.

Die Resultate der Messungen an den Hochspannungsfreileitungen zeigt die nachfolgende Tabelle, aus der zu ersehen, dass die Isolation der Spannung indirekt proportional ist.

Tabelle No. 18.

No.	Isolationswiderstand total in Megohm	Isolationswiderstand pro Isolator	Spannung	Pol, an welchem die Leitung liegt	Bemerkung
1	2631	0·877	20 000	negativ	schönes Wetter
2	2220	0·740	20 000	positiv	"
3	0·864	—	20 000	"	schlechtes Wetter
4	1·115	—	10 000	"	"
5	1·177	—	4 000	"	"
6	0·882	—	20 000	negativ	"
7	1·082	—	10 050	"	"
8	1·180	—	4 080	"	"

228. Revisionen.

Als vom Verband Deutscher Elektrotechniker aufgestellte Regel gilt, dass in Warenhäusern, Theatern, sowie feuergefährlichen und durchtränkten Räumen, jährlich mindestens einmal, in gewöhnlichen Läden, Betriebsräumen und Bureaux alle drei Jahre und in Wohnungen alle fünf Jahre einmal eine Revision vorgenommen werden muss, bei der auch genaue Isolationsmessungen vorzunehmen sind. Die Feuerversicherungen verlangen häufigere Revisionen und bedingen beim Abschluss von Versicherungen, gleichgültig um welche Räumlichkeiten es sich handelt, eine alljährliche Revision aus.

Wahrscheinlich werden seitens der Betriebsbeamten weit häufiger Messungen vorgenommen werden, ganz abgesehen davon, dass in den Centralen meistens Instrumente angeordnet sind, die die jeweiligen Isolationswiderstände dauernd anzeigen und die mit den übrigen Schaltbrettinstrumenten zeitweise abgelesen und in das Betriebsjournal eingetragen werden. In Anlagen, welche eine höhere Spannung wie 250 Volt gegen Erde führen, ist die Anbringung von Instrumenten, mit denen der Isolationszustand auch während des Betriebes beobachtet werden kann, Vorschrift. Isolationsmessungen sollen möglichst mit der Betriebsspannung vorgenommen werden, oder wenn dies nicht möglich ist, mit einer Spannung von mindestens 100 Volt. Das Messresultat wird dann auf die Betriebsspannung umgerechnet.

229. Rückwirkende Kraft der Sicherheits- vorschriften.

Bei Ausarbeitung der Sicherheitsvorschriften ist bereits vom Verband Deutscher Elektrotechniker erörtert worden inwieweit diese rückwirkende Kraft auf bereits ausgeführte Anlagen haben sollen.

Massregeln zur Herbeiführung persönlicher Sicherheit in elektrischen Anlagen.

230.
Vorsichts-
massregeln
an elek-
trischen
Maschinen.

Die stromführenden Teile von Generatoren und Motoren müssen während des Betriebes der zufälligen Berührung entzogen sein. Zu diesem Zwecke werden in der Regel die Zuführungsklemmen von Hochspannungsmaschinen, um die es sich hierbei in erster Linie handeln wird, mit isolierenden Schutzkästen überdeckt. Bei Gleichstromdynamos, die für Bahnbetrieb mit Spannungen bis 1000 Volt arbeiten, wird sich aber eine Abschliessung der stromführenden Teile, wie des Kommutators u. s. w. nicht ermöglichen lassen, es wird aber dafür gesorgt werden müssen, dass die Bedienung derartiger Maschinen nur durch zuverlässiges und bestens instruiertes Personal erfolgt.

Vom Gesichtspunkt der persönlichen Sicherheit kommen für Generatoren und Motoren für höhere Betriebsspannungen zwei Aufstellungsarten in Frage:

Sie werden isoliert aufgestellt und mit einem isolierenden Bedienungsgange umgeben

oder

die Gestelle werden geerdet und der die Maschine umgebende Erdboden, sofern er leitet, ebenso wie in unmittelbarer Nähe befindliche Geländer u. s. w. werden an die Erdleitung mit angeschlossen.

Die erstere Art wird verhältnismässig seltener vorkommen, da es meistens bedeutend schwieriger sein wird zumal grosse Maschinen gut zu isolieren, als sie gut zu erden und wird sich auf die Fälle beschränken, wo es sich um kleinere Maschinen handelt oder wo, wie bei dem in der Schweiz viel verwendeten System THURY, eine grössere Anzahl von Gleichstrommaschinen in Serie geschaltet werden, bei geerdeter Aufstellung also ein häufiges Durchbrechen der Isolation befürchtet werden muss.

Bei der zweiten Art muss danach gestrebt werden, die Erdverbindung möglichst gut herzustellen. Eine gute Erdverbindung wird aber ebensowenig durch die tief in die Fundamente eingelassenen Fundamentanker und den direkten Anschluss der Generatorwelle an die Antriebsmaschine, die zwar durch ihre Rohrleitungen mit grossen Wassermengen in Verbindung steht, erreicht, wie durch eine Drahtleitung von geringem Querschnitt. Bei der Wahl des zur Erdung benutzten Leiters wird man auf die Stromstärken Rücksicht nehmen müssen, die gegebenenfalls vom Gestell durch die Erdleitung zur Erde abfliessen können, um zu vermeiden, dass grössere Spannungsdifferenzen zwischen Gestell und Erde auftreten. Man wird daher einen solchen Querschnitt wählen, der zu dem Leiterquerschnitt, der den Strom vom Generator abführt oder dem Motor zuführt, in einem einigermaßen annehmbaren Verhältnis steht. Es ist jedoch auch zu beachten, dass, wie früher¹⁾ auseinandergesetzt wurde, stets ein nicht unerheblicher Übergangswiderstand zwischen Erdungsvorrichtung und Erde besteht, der dazu beiträgt, dass der eventuell auftretende Strom über ein gewisses Mass nicht ansteigen kann.

Mit Rücksicht aber darauf, dass diese Erdleitungen allen möglichen Verletzungen ausgesetzt sind, ist der geringste zulässige Querschnitt 25 mm².

1) Vgl. Hdb. VI, 1 S. 417.

auch durch die Anbringung fester isolierender Platten (Glas) zwischen den gefährlichen Stellen ein genügender Sicherheitszustand geschaffen werden.

Während der Ladung schlagen sich Säuretropfen auf den Zellen, Wänden und Gestellen nieder und vermitteln häufig einen Stromübergang zur Erde. Es können daher sehr leicht zwischen einzelnen Stellen des Fussbodens und den Zellen Spannungen auftreten, die gefährlich werden können, wenn die Batterie für eine 250 Volt übersteigende Spannung bestimmt ist. Infolgedessen müssen derartige Batterien mit isolierenden Bedienungsgängen umgeben sein.

Säure- und Bleivergiftungen kommen in Akkumulatorenbetrieben¹⁾ sehr selten vor und können bei genügender Reinlichkeit so gut wie ganz vermieden werden. Vor allem ist der Genuss von Speisen und Getränken in Akkumulatorenräumen zu unterlassen. Diese Bedingung ist leicht zu erfüllen, da diese Räume nur selten betreten werden. Die während der Ladung beim Kochen der Elemente mitgerissenen Säureteilchen reizen zum Husten, haben aber gar keine schädlichen Folgen, vorausgesetzt, dass reine Schwefelsäure verwendet wird. Beim Mischen der Säure mit Wasser muss die Säure dem Wasser zugesetzt werden, nie umgekehrt.

233.
Schutz-
massregeln
an Schalt-
tafeln.

Beim Aufbau von Schalttafeln ist dafür zu sorgen, dass der hinter ihr befindliche Raum, der häufig für die Leitungsführung und die Unterbringung aller möglichen Apparate verwendet werden muss, so gross gewählt wird, dass sich der bedienende Wärter frei bewegen kann. Die in den Sicherheitsvorschriften vorgeschriebenen Entfernungen²⁾ sind inne zu halten und vor allem auch die Anordnung der Apparate, welche häufig bedient werden müssen, so zu treffen, dass sie ohne besondere Hilfsmittel, insbesondere ohne Ersteigen von Leitern zugänglich sind und sich, wenn irgend möglich, in handlicher Höhe befinden.

Für Hochspannungsanlagen können zur Sicherung des Wärters zwei verschiedene Schalttafelanordnungen getroffen werden:

Entweder werden alle Teile, welche unter Spannung gegen Erde stehen, sowohl auf der Vorder- als auch auf der begehbaren Rückseite durch Gehäuse, Schutzkästen und dergleichen gegen Berührung geschützt und gleichzeitig die Schalttafel mit einem isolierenden Bedienungsgang umgeben,

oder

alle stromführenden Teile, welche nicht das Potential der Erde besitzen, müssen gegen Berührung unzugänglich angeordnet und die nicht stromführenden Teile der der Berührung zugänglichen Apparate untereinander und mit dem Gestelle verbunden sein und sich ferner mit dem umgebenden Fussboden in leitender Verbindung befinden.

1) Für Fabriken, welche sich mit der Herstellung von Bleiakkumulatoren beschäftigen, ist zum Schutze der Arbeiter im Reichsanzeiger vom 14. Mai 1898 (vgl. ETZ 1898, S. 330) eine Verordnung des Reichskanzlers veröffentlicht, die in der ETZ 1899, S. 48 näher besprochen wird (vgl. auch Arbeiten aus dem Kaiserl. Gesundheitsamte, Bd. XV, Heft 1). Beide haben insofern hier Interesse, als sie teilweise auch bei der Montage der Batterien zu beachten sind. — Vgl. auch S. 376 dieses Bandes: „Schutzmassregeln gegen Bleivergiftung bei Kabelarbeiten“.

2) Hdb. VI, 2, S. 3, Schalttafeln. Sicherheitsvorschriften für Niederspannung § 4b, für Hochspannung § 4b, Abs. 3.

Vorsichtsmassregeln nur von instruiertem Personal betreten werden können. Die vorerwähnte Vorschrift wird noch durch die folgende ergänzt:

„Die stromführenden Teile aller in eine Leitung eingeschalteten Apparate müssen derart geschützt sein, dass sie der Berührung durch Unbefugte entzogen sind.“

Es zielen daher auch alle modernen Konstruktionen darauf hin, alle stromführenden Teile durch Isoliermaterialien zu verdecken, sei es, dass Kappen oder Platten aus Papier, Porzellan, Speckstein oder dergl. in irgend einer Art über den betreffenden Teilen befestigt werden, sei es, dass ganze Gruppen von Apparaten hinter Glasplatten verlegt werden. Auch die Unterbringung der Apparate in eisernen Gehäusen, die dann geerdet werden, entsprechen dem Zweck. In allen Fällen aber, wo eine Abschliessung stromführender Teile nicht möglich ist, wie dies z. B. bei grösseren Hochspannungsschaltern meistens der Fall sein wird, wird durch die Montage der Apparate die durch die oben erwähnten Vorschriften verlangte Sicherheit erreicht werden müssen.

235.
Vorsichts-
massregeln
in Centralen.

Immerhin muss hierbei eine scharfe Grenze gezogen werden zwischen solchen Teilen einer Anlage, die nur instruiertem Personal zugänglich sind, wie dies bei den Stromerzeugungsstellen fast ausnahmslos der Fall ist, und solchen, die allgemein zugänglich sind. Für die zuerst genannten Räume wenigstens, soweit es sich um Niederspannungsanlagen handelt, muss in Bezug auf die Anbringung aller Apparate, wie auch auf die Wahl der Installationsmaterialien, insbesondere der Leitungen die grösste Freiheit in Anspruch genommen werden, zumal viele Konstruktionen für alle möglichen Räume gut verwendbar, für die Centralen aber aus den mannigfachsten Gründen, die hauptsächlich durch Betriebsrücksichten bedingt sind, nicht annehmbar sind. Dasselbe gilt sinngemäss von der Verwendung blanker Leitungen.

Aber auch für die Stromerzeugungsanlagen für hochgespannte Ströme dürfen dem Erbauer nur insofern besondere Einschränkungen auferlegt werden, als für das Bedienungspersonal Standorte geschaffen werden müssen, an denen es mit stromführenden Teilen nicht in Berührung kommen kann. — Es werden daher auf den Vorderseiten der Schalttafeln alle stromführenden Teile verdeckt, die Handhabung der Schalter erfolgt durch Gestänge, Kettenübertragungen und dergl. Dagegen werden hinter den Schalttafeln, sowie in Transformatorenräumen und den sogenannten Hochspannungskammern alle Leitungen, die z. B. auch blank verlegt werden können, alle Kontakte u. s. w. nicht geschützt, da an diesen Stellen mit Rücksicht auf eine sichere Betriebsführung die grösste Übersichtlichkeit ein dringendes Bedürfnis ist.

236.
Warnungs-
zeichen.

Jedenfalls ist es aber in allen Fällen erforderlich, durch die Anbringung von Warnungstafeln und durch eingehende Information des Bedienungspersonals auf die Gefahr der Berührung unter Spannung stehender Leiter aufmerksam zu machen.

Dies gilt nicht allein für Hochspannungs-, vielmehr auch für Niederspannungsanlagen und bei diesen hauptsächlich dann, wenn es sich um durchtränkte Räume, wie überhaupt um besonders gefährliche Räume oder Stellen handelt.

Führen die Leitungen Hochspannung, so müssen die Warnungstafeln durch einen roten Zickzackpfeil, sogenannten Blitzpfeil besonders kenntlich gemacht werden. Sollen diese Warnungstafeln aber ihren Zweck erfüllen,

zwischen Punkten verschiedener Entfernungen vom Mast und diesem selbst angestellt wurden, ergaben die in den Kurven (Fig. 356) ersichtlichen Werte. Als Abscissen sind die Entfernungen vom Mast, als Ordinaten die bei den verschiedenen Abständen beobachteten Spannungen eingetragen. Es zeigt sich, dass selbst bei geerdetem Mast schon in einer Entfernung von 0.5 m, und zwar bei der niedrigen Betriebsspannung von 2000 Volt eine unter Umständen tödlich wirkende Spannung von 500 Volt besteht.

An diese Versuche knüpft WILKENS¹⁾ sehr bemerkenswerte Betrachtungen, in denen er ebenfalls darlegt, dass durch die obenerwähnte Erdung ein sicherer Schutz nicht gewährt werden kann. In der Versuchsanordnung (Fig. 355) fliesst einmal ein Strom i_1 vom Generator zum Mast und von diesem über die Erdplatte E_1 zum Generator zurück. Ein zweiter Stromkreis wird vom Mast über E_2 und E_1 gebildet, so dass die Leitung L lediglich einen Stromzuwachs von i_2 erhält, wodurch aber der Zustand des Mastes zu dem ihn umgebenden Erdreich nicht unbedingt eine Änderung durch das Anlegen der Erdplatte E_2 an den Mast M erfahren muss. Eine Erdung in dieser Weise kann daher nur dann einen Schutz gewähren, wenn durch den Strom i_2 eine Abschaltung der mit dem Mast in Kontakt getretenen Leitung L bewirkt, bzw. die letztere stromlos oder spannungslos gemacht wird.

Das einfachste Mittel, um derartige Leitungen stromlos zu machen, wäre, den resultierenden Strom i_2 selbst zur Abschaltung heranzuziehen, sei es durch die Wahl geeigneter Automaten oder Sicherungen. Eine genügende Sicherheit wäre aber hierdurch nicht gegeben, trotzdem durch derartige Erdschlüsse häufig sehr hohe Stromstärken fliessen. So wurde an einem Strassenbahnmast in Aachen²⁾ bei trockenem Wetter ein Strom von 50 Amp. beobachtet, der bei feuchtem Wetter auf 150 Amp. anstieg. Trotzdem kann es aber infolge der Selbstinduktion der Leitungen und der geringen Zunahme der Stromstärke beim Kurzschliessen der Wechselstromleitungen vorkommen, dass die Sicherungen nicht durchgehen und der Leitungsträger bleibt unter hoher Spannung. Ist der Erdleitungswiderstand gering, so ist es wahrscheinlich, dass der Fehler bald gefunden wird. Anders jedoch, wenn derselbe eine beträchtliche Höhe besitzt. Häufig wird man dann auf die Leckage erst durch einen Unglücksfall aufmerksam.

Die Erdung muss also so gut wie irgend möglich hergestellt werden, indessen ist es, wie wir an anderer Stelle³⁾ gesehen haben, praktisch äusserst schwer, einen Erdungswiderstand zu erreichen, der unter 20 Ohm liegt, und müssten daher möglichst alle Erdplatten desselben Netzes durch eine besondere Leitung parallel geschaltet werden und die Oberfläche der Erdplatten muss so viel wie möglich vergrössert werden. In ausgedehnten Fernleitungsnetzen wird sich dies der Kosten wegen selten ermöglichen lassen, ganz abgesehen davon, dass durch mechanische und chemische Einflüsse die Verbindungsleitung beschädigt und unterbrochen werden kann, wodurch ihr Zweck naturgemäss verfehlt sein würde.

Es gibt nun zwei Wege, um der den Menschen drohenden Gefahr unter Hochspannung stehender Eisenmasten zu begegnen. Den einen geben die

1) ETZ 1902, S. 1129.

2) ETZ 1901, S. 372.

3) Hdb. VI, 1, S. 417.

Sicherheitsvorschriften¹⁾ an, und zwar für den Fall, dass eine gute Erdung nicht erreicht werden kann. „Eiserne Maste müssen mit einer 2 m über den Erdboden reichenden vom Mast abstehenden hölzernen Schutzverkleidung

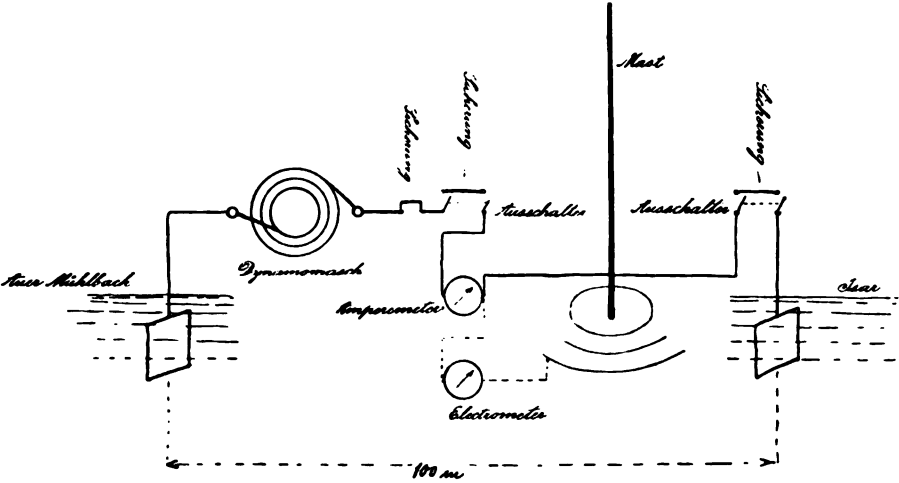


Fig. 354.

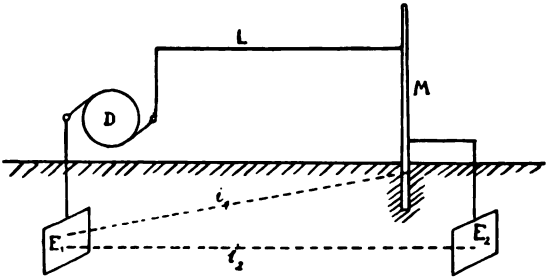


Fig. 355.

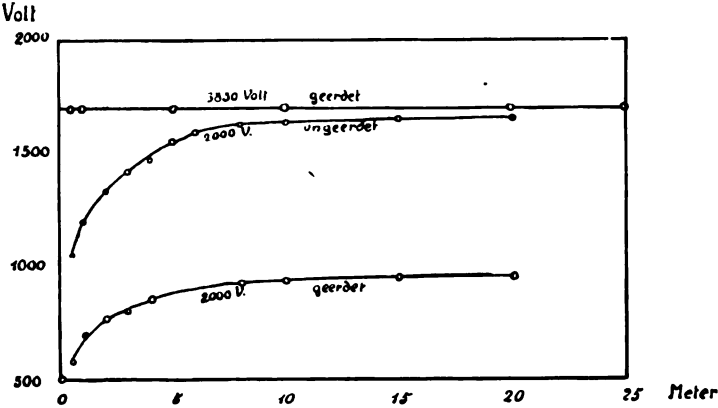


Fig. 356.

umgeben werden.“ Diese hat den Zweck, eine unbeabsichtigte Berührung des Mastes selbst zu verhindern und auch bei feuchter Witterung einen

1) Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Anlagen, Hochspannung § 23 r.

solchen Widerstand in den über einem menschlichen Körper gebildeten Stromkreis einzuschalten, dass eine Schädigung desselben nicht mehr erwartet werden kann.

Einen anderen Weg wählt WILKENS,¹⁾ der ebenfalls von der Thatsache ausgeht, dass eine gute Erdung schwer zu erreichen und selbst, wenn sie erreicht ist, gefährliche Spannungen nicht ausschliesst. „Bekanntlich treten in einem Widerstand dadurch Spannungsdifferenzen auf, dass derselbe von einem Strom durchflossen wird. Die Grösse der Spannungsdifferenz längs des Widerstandes ergibt sich von Längenelement zu Längenelement aus dem jeweiligen Produkt von Strom und Widerstand

$$e = i w$$

und

$$e = \frac{i}{q} l c.$$

Da aber $\frac{i}{q}$ die Stromdichte darstellt, so erzielt man eine Verminderung der Spannungsdifferenz zwischen zwei gegebenen, z. B. von einer Person noch berührbaren Punkten einmal durch Verringerung der Stromdichte und andererseits durch Verringerung des spezifischen Widerstandes des Erdreichs. Sorgt man also bei einem Mast für eine grössere metallische Ausbreitung möglichst dicht an der Erdoberfläche, etwa durch eine Metallscheibe oder ein spiralförmig um den Mast gewundenes Drahtseil, ähnlich wie es Fig. 357 zeigt,

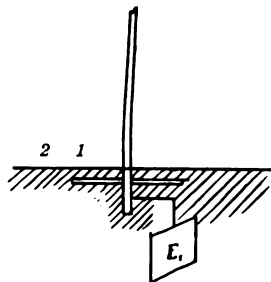


Fig. 357.

so kann man durch entsprechende Ausdehnung dieser Platte jede beliebige Sicherheit erreichen. Soll an der Grenze dieser Scheibe, z. B. zwischen den Punkten 1 und 2, woselbst ja nur noch eine gefährliche Spannungsdifferenz auftreten könnte, ein vorgeschriebener Wert nicht überschritten werden, so braucht man nur den Durchmesser der Scheibe so gross zu wählen, bis die im ungünstigsten Fall zu erwartende Stromdichte an dieser Stelle genügend klein ausfällt. Diese Bedingung wird um so leichter erfüllt werden, je günstiger die Bodenverhältnisse für die Erdung sind, weil alsdann der Hauptanteil des resultierenden Erdstromes durch die Erdplatte *E* in tiefere Schichten der Erde übergeleitet wird.“

Es kennzeichnet sich somit auch hier das Bestreben, diejenigen Punkte, von denen aus eine Berührung von Metallteilen, die eine gefährliche Spannung annehmen können, stattfinden kann, auf das gleiche Potential wie diese zu bringen, wie wir es auch schon auf Seite 355 dieses Bandes vorschlugen. Jedenfalls wird hierdurch eine bei weitem grössere Sicherheit geschaffen, als es durch eine mangelhafte Erdung der Fall sein kann.

Nach in Amerika ausgeführten Versuchen²⁾ scheint es auch erforderlich zu sein, an hölzernen Masten von Hochspannungsfernleitungen besondere Schutzmassregeln zu treffen, da auch zwischen nassen Holzmasten und der

1) ETZ 1902, S. 1130.

2) ETZ 1905, S. 239.

anschlüsse zu erhalten pflegen, ist sehr darauf zu achten, dass in Wohnräume nie gleichzeitig beide Aussenleiter eingeführt werden. Vielmehr sind von den Verteilungspunkten aus, die der Berührung sorgfältig zu entziehen sind, die beiden Aussenleiter möglichst weit auseinander zu verlegen, auf jeden Fall, wo sie nebeneinander herlaufen müssen, sicher in metallüberzogenes Rohr einzuziehen.

Es ist darauf zu achten, dass einfach verlegte Leitungen, also solche ohne Eisen- und Stahlrohr- u. s. w. Verkleidung, nicht durch Tische, Stühle, Leitern u. s. w. beschädigt werden können. Das Anhäufen von Metallabfällen in der Nähe solcher ungeschützten Leitungen ist keinesfalls zu dulden. Auch dürfen ungeschützte Leitungen nicht durch Herüberhängen von Gegenständen verdeckt werden.

Irgend welche Beschädigungen des Leitungsnetzes sind sofort der zuständigen Stelle zu melden, damit geeignete Vorkehrungen zur Verhütung von Kurzschlüssen u. s. w. getroffen werden können.

Elektrische Leitungen dürfen nicht in der Nähe von irgend welchen Heizkörpern oder stark erhitzten Wänden liegen. Werden Heizkörper später angebracht, so sind eventuell die Leitungen anders zu verlegen.

Sämtliche Schutzvorrichtungen, einerlei welcher Art, müssen systematisch auf ihr richtiges Funktionieren revidiert werden.

Blitzschutzvorrichtungen sind öfter zu reinigen und nach jedem Gewitter einer genauen Kontrolle zu unterziehen.

Besonderen Gefahren sind die Arbeiter in sogenannten durchtränkten Räumen ausgesetzt, zu denen alle diejenigen Teile von industriellen und gewerblichen Betrieben gehören,¹⁾ in denen erfahrungsgemäss durch ungewöhnlich starke oder gutleitende Feuchtigkeit die dauernde Erhaltung normaler Isolation erschwert und der Widerstand des Körpers der darin beschäftigten Personen gegen Erde erheblich vermindert wird.

Hier genügt es nicht nur, die Leitungen dem handlichen Bereich zu entziehen, sie durch Rohre, hölzerne Schutzverkleidungen und dergl. zu verdecken, sondern es muss durch besonders angebrachte Warnungstafeln auf die Gefahr der Berührung aufmerksam gemacht werden.

WEBER²⁾ sieht ein wesentliches Hilfsmittel zur Verminderung der persönlichen Gefahren in derart ungünstigen Räumen darin, dass die hier herrschende Feuchtigkeit, die in Verbindung mit Schmutz gut leitet, bekämpft wird.

„Auch in Betrieben, welche ätzende Stoffe benutzen, oder bei denen feuchte Räume nicht vermieden werden können, lassen sich vielfach deren schädliche Einflüsse von vornherein einschränken. Gelingt es zum Beispiel, die Räume trocken zu halten, so können auch ätzende Stoffe weder auf die Isolation der elektrischen Einrichtungen, noch auf den menschlichen Körper in so hohem Masse schädlich einwirken, wie bei dauernder hochgradiger Feuchtigkeit. Die Feuchtigkeit selbst kann, wo sie nicht zu vermeiden ist, durch Anlage von Senkgruben, Ablaufrinnen, erhöhte Standplätze, unter Benutzung geeigneten Materials, wie Cement, Asphalt u. s. w. auf bestimmte Grenzen beschränkt werden. Die Benutzung wasserdichter und glatter Fussböden und Wände gestattet auch in Verbindung mit etwas Sorgfalt und Mühe

1) Sicherheitsvorschriften § 43.

2) Erläuterung zu den Sicherheitsvorschriften, Berlin 1905, S. 161.

Leitungen wurden gewaltsam eingezogen, ihre Isolierung beschädigt und von vornherein ein Körperschluss herbeigeführt, oder doch wenigstens eine schwache Stelle geschaffen, die später den Anlass zu Störungen gab. Diesen Fehler beseitigte die isolierte Aufhängung des Beleuchtungskörpers nicht, er wurde nur verdeckt und konnte bei Isolationsmessungen nicht gefunden werden, dagegen konnte der Metallkörper der Armatur hierdurch unter Spannung gesetzt werden. Von der richtigen Voraussetzung ausgehend, dass nur durch richtige Konstruktion der Beleuchtungskörper und der zur Verwendung kommenden Leitungen eine Besserung erwartet werden könne, schrieb der Verband Deutscher Elektrotechniker bestimmte lichte Rohrweiten für Beleuchtungskörper vor, die bei Niederspannung 6 mm, bei Hochspannung 12 mm nicht unterschreiten dürfen. Bezüglich der Leitungen wurde ein Unterschied zwischen Niederspannung und Hochspannung gemacht und für jene besondere „Fassungsadern“¹⁾ geschaffen, deren geschlossene Gummipressung eine geringere Wandstärke besitzt, wie die übrigen Gummiaderleitungen. Hierdurch wurde dem grossen Industriezweig, welcher Beleuchtungskörper baut, Erleichterung, trotzdem aber eine grosse Sicherheit geschaffen. Für solche Beleuchtungskörper jedoch, in die Spannungen von mehr als 250 Volt eingeführt werden, müssen Gummiaderleitungen verwendet werden. Aus diesem Grunde erklären sich auch die verschieden verlangten lichten Weiten. Jedenfalls ist aber durch diese Anordnungen ein Sicherheitszustand geschaffen, der früher häufig sehr vermisst wurde.

Fig. 358.

Weit häufiger als bei Glühlichtbeleuchtung findet bei der Verwendung von Bogenlicht das Hintereinanderschalten vieler Lampen statt. Infolge der hierbei verwendeten hohen Spannung ist aber die Bedienung derselben und insbesondere das Einsetzen der Kohlen gefährvoll; in besonders gefährdeten, feuchten oder durchtränkten Räumen bedarf es zudem keiner hohen Spannung. Derartige Lampen dürfen während der Bedienung nicht unter Spannung

stehen, und zwar wird zum mindesten die Anordnung allpoliger Aussalter verlangt werden müssen. Wesentlich besser ist es für viele Fälle, wenn die zur Bedienung herabgelassenen Bogenlampen automatisch abgeschaltet werden. In der Regel geschieht dies durch sogenannte Bogenlampenkuppelungen, deren Verwendung die herunterhängenden Stromzuführungen überflüssig machen und eine feste Verlegung der Leitungen ermöglichen. Beim Herunterlassen der Lampe wird die Kuppelung (Fig. 358 u. 359), die nichts weiter ist, wie ein Steckkontakt, bei welchem der obere Teil fest am Aufhängepunkt, der Stecker oberhalb der Armatur befestigt ist, gelöst und die Lampe kann im spannungslosen Zustand bedient werden.

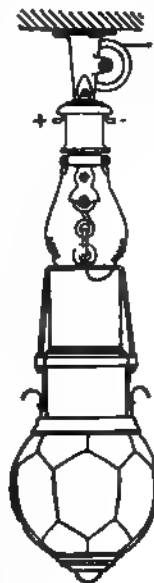


Fig. 359.

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 163 und Sicherheitsvorschriften § 7 e.

spannungsbetriebe wären vermieden worden, wenn die Arbeiter sich nach ihren Anweisungen gerichtet hätten.

Sogenannte Hochspannungsräume, in denen Hochspannung führende Leitungen und Apparate ungeschützt und eventuell auch blank in erreichbarer Höhe zugänglich sind, die aber, um den Eintritt von nichtinstruiertem Personal oder von Unbefugten zu verhindern, verschlossen gehalten werden müssen, dürfen während des Betriebes nur von zwei Personen gleichzeitig betreten werden. Auch bei Arbeiten an nichtstromführenden Teilen, am Gebäude selbst, muss ein Sachkundiger anwesend sein; verlässt der eine den Raum, so ist auch der zweite gehalten, hinauszugehen. Auf alle Fälle darf nur instruiertes Personal in derartigen Räumen arbeiten. Handwerker, die nicht Elektrotechniker sind, aber trotzdem während des Betriebes arbeiten müssen, wie Maurer oder dergl., sind vor dem Betreten auf das eingehendste auf die Gefahr der Berührung aufmerksam zu machen.

Zum eigenen Schutze des Betriebsleiters ist es sehr zu empfehlen, die mündlichen Instruktionen in Gegenwart von Zeugen vorzunehmen, eventuell auch durch schriftliche zu ergänzen, über deren Empfang der Betreffende quittiert und hierbei ausdrücklich erklärt, eingehende Informationen empfangen zu haben.

241.
Abschal-
tung, Kurz-
schliessung
und Erdung
von Hoch-
spannungs-
leitungen.

Im allgemeinen darf an irgend einem Teil einer Hochspannungsanlage nur dann gearbeitet werden, wenn derselbe ausgeschaltet, und zwar allpolig ausgeschaltet ist, sich also im spannungslosen Zustand befindet. Gleichzeitig werden aber an der Arbeitsstelle alle Leitungen miteinander verbunden unter gleichzeitiger Erdung der kurzschliessenden Leitung.

Die Abschaltung derjenigen Teile, an denen gearbeitet werden soll, muss in zuverlässiger Weise und von sicher instruiertem Personal erfolgen. Um jedoch Irrtümer auszuschliessen und im Notfalle auch solche Personen in die Lage zu setzen, die Ausschaltungen vorzunehmen, die an und für sich sachverständig, aber die in Frage kommende Schaltung nicht kennen, muss in jeder Schalt- und Transformatorenstation ein genaues Schaltungsschema und ein Übersichtsplan vorhanden sein, mit deren Hilfe man sich sofort orientieren kann. Vorteilhaft und zur Sicherheit beiträgend ist es, wenn auf diesem Plan die Reihenfolge der Handgriffe verzeichnet steht, die bei der Ausschaltung und eventuellen Kurzschliessung und Erdung zu beachten sind, falls auch für die letzteren Massnahmen feste Einrichtungen und Schalter vorgesehen sind.

Die Kurzschliessung und Erdung bezwecken, wie der Verband Deutscher Elektrotechniker seine Betriebsvorschriften erläutert,¹⁾ dem Personal ein Berühren der betreffenden Leiterteile ohne Gefährdung zu ermöglichen. Die Kurzschliessung soll dabei unter anderem bewirken, dass bei irrtümlicher Einschaltung derjenigen Leiterteile, an welchen gearbeitet wird, die zugehörigen Sicherungen abschmelzen und die Leitung dadurch stromlos wird. Da hierbei jedoch die Schmelzsicherung einer Leitung (eines Poles) unversehrt bleiben und letztere somit die Hochspannung gegen Erde behalten kann, so ist die betreffende Leitung ausserdem noch zu erden. Durch diese Erdverbindung kann unter Umständen ein derart starker Strom fliessen, dass auch die letzte Sicherung der geerdeten Leitung funktioniert. Deshalb ist die Erdungsverbindung so herzustellen, dass sie genügende Leitungsfähigkeit besitzt.

1) ETZ 1903, S. 155.

ist. Man kann allerdings auf verschiedene Art, z. B. durch die ETZ 1902, S. 843 beschriebene Induktionsmethode mit ziemlicher Sicherheit feststellen, ob ein Kabel unter Spannung liegt oder nicht. Immerhin ist in allen diesen Fällen so zu verfahren, als wenn die Erdung und Kurzschliessung nicht vorgenommen wäre und es müssen dann die Schutzmittel und Vorsichtsmassregeln angewendet werden, die bei unmittelbarer Arbeit an Hochspannung führenden Leitungen angewendet werden müssen und nachstehend erörtert werden sollen.

Die grosse Gefahr der Arbeit bedingt, dass eine genügende Überwachung derselben stattfindet und ist es daher Pflicht des Betriebsleiters, entweder selbst dabei zu bleiben oder aber einem anderen ausdrücklich die Beaufsichtigung zu übertragen.

Gleichwie bei Niederspannungsanlagen müssen auch die übrigen stromführenden Teile, an denen nicht gearbeitet wird, geschützt werden, damit die unbeabsichtigte Berührung anderer Leitungen oder die gleichzeitige Berührung von Leitungen verschiedenen Potentials vermieden wird.

242.
Arbeiten
während der
Betriebs-
pausen.
Ver-
abredung
auf Zeit.

Sind Arbeiten während Betriebspausen an einem Hochspannungsnetz oder Teilen desselben ausgeführt worden, so darf die betreffende Strecke erst dann wieder unter Spannung gesetzt werden, wenn es sicher ist, dass die Arbeiter nicht mehr an den betreffenden Stellen arbeiten. Es war eine häufig angewendete Gepflogenheit, dass vor Beginn der Arbeit bestimmte Zeiten verabredet wurden, zu welchen die Einschaltung wieder erfolgen sollte. Die Monteure sollten in solchen Fällen die Arbeit 10—15 Minuten vorher beenden bzw. unterbrechen. Bei der grossen Ausdehnung der Hochspannungsnetze, die den Verkehr zwischen Centrale und Strecke sehr erschwert, wäre ein derartiges Übereinkommen gewiss von Vorteil, wenn nicht verschiedene Umstände einen grossen Nachteil bedingen würden. In erster Linie können bei einer Verabredung auf eine bestimmte Zeit Missverständnisse sehr leicht unterlaufen, die Uhren können differieren; schliesslich muss aber auch damit gerechnet werden, dass der Monteur die z. B. infolge einer Betriebsstörung an den Leitungen bedingte Arbeit nicht genügend schnell fertigstellen kann und bis wenige Minuten vor dem angegebenen Zeitpunkt zu arbeiten beabsichtigt, die Zeit aber verpasst. Es wird daher wohl stets ein Zeitpunkt für die Wiedereinschaltung verabredet, sie erfolgt aber erst dann, wenn eine sichere Meldung darüber eingelaufen ist, dass die Arbeiter zurückgezogen sind. Da sich fast an jeder Fernleitung Telephonleitungen entlangziehen, so können diese Meldungen leicht durch transportable Streckentelephone erfolgen, eventuell können die Fernleitungen selbst zum Telephonieren benutzt werden.

Auch in diesem Fall ist der Betriebsleiter selbst oder ein ausdrücklich von ihm Beauftragter gehalten, diese Meldungen entgegenzunehmen und auf ihre Zuverlässigkeit zu prüfen; ebenso muss er sich auch persönlich davon überzeugen, dass alle Schaltungen in betriebssicherer Weise wiederhergestellt worden sind, insbesondere dass ein Übertritt von Hochspannung in Strecken, welche noch nicht in Betrieb genommen werden können, oder in Niederspannungskreise nicht möglich ist, und dass durch das Einschalten Personen nicht in Gefahr geraten. In verschärftem Masse gilt dies, wenn Neuanlagen in Betrieb genommen werden; in diesem Falle muss eine Begehung und Prüfung der Strecke erfolgen.

243.
Einsetzen
von
Sicherungen
während des
Betriebes.

Eine Arbeit, die fast regelmässig während des Betriebes vorgenommen werden muss, ist das Einsetzen von Sicherungen. Häufig sind Ausschalter nicht angebracht oder sie sind, um sie selbst zu sichern, so angeordnet, dass

sind, wird zweckmässig eine geerdete Leitung in nächster Nähe vorbeigeführt, um die an der Zange angebrachte bewegliche nicht zu lang abrollen zu müssen. Hierauf ist stets zu achten, da sonst die zum Schutz angeordnete Leitung zu Kurzschlüssen Ursache geben kann.

SCHÜCKERT & Co. haben für solche Fälle, wo es wünschenswert erscheint, insbesondere für Betriebe, in denen häufig Isolationsfehler auftreten und daher die Einsetzung von Sicherungen nicht ungefährlich ist, Schaltkasten mit Verriegelung (D. R.-P. 108387) verwendet. Die Stromzuführung erfolgt zuerst zum Schalter und dann zu den darunter angeordneten und durch eine besondere Thür zugänglichen Sicherungen. Die Achse des Schalters ist nun mit dieser Thür in eine solche Abhängigkeit gebracht, dass sie nur bei offenem Schalter, also spannungslosen Sicherungen geöffnet werden kann. Durch das Öffnen der Thür wird aber die Schalterachse wieder verriegelt, so dass der Schalter so lange nicht geschlossen werden kann, wie die Thür offen steht. Nach dem Schliessen wird der Schalthebel freigegeben, die geringste Drehung seinerseits bewirkt wieder die Verriegelung der Zugangsthür.

244.
Gummi-
handschuhe.

Gegen die Einwirkung der Hochspannung schützt man sich, indem man gute isolierende Standorte schafft, die entweder aus starken Gummimatten oder aus hölzernen Gestellen, die auf Isolatoren von hohem Isolationswert aufgestellt sind, bestehen können. Gutes Schuhwerk und übergezogene Gummischuhe erhöhen die Sicherheit. Die Hände werden mit Gummihandschuhen bekleidet, soweit es die Art der Arbeit irgend zulässt. Um dem häufigen Reißen des Gummis vorzubeugen, werden die Handschuhe häufig mit sehr dünnem Leder oder Trikot ausgekleidet, welches auch die im gewöhnlichen Gummihandschuh auftretende lästige Schweissbildung an den Händen verhindert.

Um für Arbeiten an Hochspannungsanlagen ein möglichst gutes Material zu erhalten, hat die „Association des industriels de France“ Preise für Schutzhandschuhe¹⁾ ausgesetzt, welche einen unbedingten Schutz beim Handtieren mit stromführenden elektrischen Leitungen bieten sollen. Von vierzehn zumeist aus Deutschland eingesandten Handschuhtypen wurden, wie die Wochenschrift des niederösterreichischen Gewerbevereins vom 29. August 1901 mitteilt, sechs Typen in die engere Konkurrenz gezogen, und zwar:

1. CHAS. N. HILL & Co. in London: mit Trikot unterlegte Kautschukhandschuhe, deren Finger an den Verbindungen besonders verstärkt sind, während die Nähte äusserlich mit einem Kautschukstreifen überdeckt erscheinen;

2. FRANZ CLOUTH, Köln-Nippes: mit langen Manschetten versehene, gleichfalls über Trikot gezogene Kautschukhandschuhe. Das Trikot ist äusserst fest und seine Nähte sind zur Verhütung des Reißens mit schief geschnittenen Streifen überdeckt; der äussere Kautschukhandschuh jedoch ist ganz ohne Nähte und Zusammenfügungen, wodurch die Widerstandsfähigkeit erhöht wird;

3. GRISON, Paris: mehrere Typen von Lederhandschuhen, welche nach einem speziellen Verfahren dem Kautschuk gleichwertig gemacht werden sollten;

4. CARL LAUX, Neuhaudensleben: Handschuhe aus drei Schichten: Seide, Kautschuk und Hanf, ausschliesslich mit Seide genäht;

1) Bulletin de la Soc. int. des Electriciens, April 1901.

5. SCHNEPPMÜLLER, Magdeburg: Handschuhe, geschnitten aus zusammengeklebten Leder- und Kautschukblättern. Die Nähte sind äusserlich überdies durch eine Kautschuklösung bedeckt, ein zweites Leder überzieht den ganzen Handschuh;

6. Witwe SPECKERS, Zürich: Kautschuk mit Trikotfütterung.

Diese Handschuhe wurden dem Laboratoire central de l'Electricité in Paris zur Untersuchung überlassen, über deren Ergebnisse Prof. JANET im „Bulletin de la Société internationale des Electriciens“ vom April 1901 folgendermassen berichtet:

Die Handschuhe wurden sowohl bei niederer als auch bei hoher Spannung, im trockenen und im nassen Zustand untersucht und haben Folgendes ergeben:

I. Messung des Isolationswiderstandes von sechs Isolierhandschuhen verschiedener Fabrikation (bei niederer Spannung).

a) Versuche an trockenen Handschuhen: In den zu untersuchenden Handschuh wurde Quecksilber geschüttet und der Handschuh hierauf in ein Gefäss mit Quecksilber gelegt; hierauf wurde der Widerstand zwischen der äusseren und inneren Quecksilbermasse gemessen. Der Handschuh lag 20 cm tief unter der Oberfläche des Quecksilbers.

b) Versuche an feuchten Handschuhen: Die Handschuhe wurden mit feinem Sand angefüllt, der vorher durch eine wässrige Chlorhydrat-Ammoniaklösung angefeuchtet wurde, und hierauf in feuchten Sand eingebettet; die Dicke der über dem Handschuh befindlichen Sandschicht betrug 20 cm. Man erhielt bei 105 Volt folgende Resultate:

Tabelle No. 20.

Sorte der Handschuhe ¹⁾	Widerstand in Megohm	
	trockene Handschuhe	feuchte Handschuhe
A	0	0
B	0	0
C	540	0
D	4 800	420
E	6 200	24
F	52 500	157

II. Bestimmung der zum Durchschlagen der Handschuhe nötigen Spannung.

Die Versuche wurden bei der vorhin beschriebenen Anordnung der Handschuhe mit Wechselstrom vorgenommen, in der Weise, dass eine Elektrode sich im Innern des untersuchten Handschuhes, die andere in der ihn umgebenden Sandmasse befand.

1) Auf welche der oben angegebenen Firmen sich die einzelnen Buchstaben beziehen, ist nicht bekannt.

Die Spannung wurde allmählich gesteigert, bis man an dem plötzlichen Zurückschnellen des Voltmeterzeigers erkannte, dass der Handschuh durchgeschlagen ist.

Der Handschuh Sorte G, der aus einem Baumwollgewebe bestand, auf welchem Glasperlen aufgenäht waren, konnte nicht auf diese Weise untersucht werden. Zum Zwecke des Versuches wurde er aussen mit Stanniol umgeben und die Spannung zwischen dem äusseren Belag und der inneren Sandfüllung gemessen.

Die Ergebnisse des Versuches sind in folgender Tabelle aufgestellt:

Tabelle No. 21.

Handschuh- sorte	Spannung in Volt
A	0
B	0
C	0
D	2·500 bei 3000 Volt durchgeschlagen.
E	1·000 nach drei Minuten durchgeschlagen.
F	{ 11·000 Fünkchen zwischen Handschuh und Sand, 12·000 nach einer Minute durchgeschlagen,
G	
	unmessbar. Heftige Funken.

245.
Hoch-
spannungs-
Schutz-
anzug.

In ganz eigenartiger Weise hat Prof. NIKOLAUS ARTEMIEFF in Kiew einen Schutz gegen Hochspannung geschaffen, der in einem metallenen Schutzanzug besteht. Derselbe wird von den SIEMENS-SCHUOKERT Werken hergestellt und in den Handel gebracht, deren Veröffentlichung über den Schutzanzug die nachstehenden Angaben entnommen werden.

Der Schutzanzug (Fig. 362) besteht aus einem feinen, biegsamen Metallgewebe; er bildet ein zusammenhängendes Kleidungsstück, das den ganzen Körper, auch Kopf, Hände und Füsse einhüllt. Zur Erzielung grösserer Haltbarkeit ist der Metallanzug auf einem Leinenstoffgewand gearbeitet. Er ist so eingerichtet, dass man ihn auch ohne fremde Hilfe anlegen kann; die hierzu erforderlichen Schlitzte beeinträchtigen die Wirksamkeit nicht, vorausgesetzt, dass dieselben vorschriftsmässig geschlossen sind. Der Anzug wird über der gewöhnlichen Kleidung getragen. Das Metallgewebe vor dem Gesicht und an den Händen behindert das Sehen und Hantieren in keiner unzulässigen Weise.

Der Schutzanzug kann in zweifacher Hinsicht als Schutzmittel wirksam werden.

Der menschliche Körper wird durch das Metallgewebe kurzgeschlossen. Zwischen zwei Punkten am Körper können keine schädlichen Spannungsdifferenzen auftreten. Der Widerstand des Anzuges ist kleiner als 0·01 Ohm, der des menschlichen Körpers grösser als 200 Ohm, in beiden Fällen von Hand zu Hand gemessen. Es würde danach bei Annahme der genannten Grenzwerte bei Entstehen eines Kurzschlussstromes von 1000 Amp. erst eine Spannung von 10 Volt von Hand zu Hand entstehen und der den Körper durchfliessende Zweigstrom höchstens 0·005 Amp. betragen und somit gänzlich ungefährlich sein.

Mit Rücksicht auf die Erwärmung des Kupfergewebes durch Stromwärme wird man aber noch unterhalb dieses Wertes von 1000 Amp. bleiben müssen, da der Anzug etwa 200 Amp. dauernd und etwa 600 Amp. einige Sekunden führen kann.

Der Schutzanzug verhindert ferner, dass Ladungsströme in den menschlichen Körper eindringen. Man kann deshalb mit dem Schutzanzug bekleidet in einer gut isolierten Hochspannungsanlage jeden beliebigen Punkt ohne Gefahr berühren. Ist die Anlage nicht gut isoliert, so ist die Berührung trotzdem statthaft, wenn man selbst sich gut isoliert, etwa auf einer Hartgummiplatte oder auf einem Brett auf starken Porzellanisolatoren aufstellt. Hierauf bezügliche Versuche sind ausgeführt worden bei Spannungen bis zu 200000 Volt. Voraussetzung ist in beiden Fällen, dass man nicht gleichzeitig verschiedene Pole miteinander verbindet, da es sich dann nicht mehr um den geringen Ladungsstrom, sondern um einen mehr oder weniger hohen Kurzschlussstrom mit Flammenbogenbildung handelt, ein Fall, der im Nachstehenden eingehender besprochen wird.

Die Metallhülle schützt also vor Lebensgefahr gegen Hochspannung, weil sie keine tödlichen Ströme in den Körper eindringen lässt; vor Verletzungen durch Verbrennung beim Kurzschliessen grösserer Anlagen wird sie jedoch nicht immer sicher bewahren. Solange Berührung zwischen Hülle und Leitung bestehen bleibt, liegt auch bei Kurzschluss und bei Berührung eines Kabelnetzes von hoher Kapazität keinerlei Gefahr vor, wenn nur der Kurzschlussstrom bzw. der Ladungsstrom in den genannten zulässigen Grenzen (200 Amp. dauernd, 600 Amp. für einige Sekunden) bleibt. Wenn infolge der auftretenden

Fig. 362.

hohen Stromstärke vor Aufhebung der Berührung die Sicherungen schmelzen oder die automatischen Ausschalter den Stromkreis unterbrechen, so bleibt die Hülle unbeschädigt und ebenso der darin befindliche Mensch. Wenn aber die Sicherungen zu träge sind oder die Automaten versagen und die Entfernung der Hülle von der Leitung vor Unterbrechung des Stromkreises erfolgt, so wird sich ein Lichtbogen bilden, durch dessen Wärmewirkung bei genügender Intensität das Gewebe zerstört wird und die Haut Brandwunden erhalten kann.

Bei den Versuchen, bis zu welchen Grenzen Lichtbogenbildung ohne Verbrennungsgefahr noch zulässig sei, schloss Prof. ARTEMIEFF eine Maschine

In Fig. 363 u. 364 schaltet sich Prof. ARTEMIEFF mit seinem Schutzanzug zwischen die Pole eines Wechselstromtransformators für 20 Kilo-Volt-ampere bei 150000 Volt und 50 Perioden.

In Fig. 364 geht ein Funkenstrom von Pol zu Pol, die Schlagweite deutet die Höhe der Spannung an; ein anderer Funkenstrom geht von einem Pol über den Schutzanzug zum anderen Pol.

In Fig. 363 wird ein zweifacher Funkenstrom von je einem Pol zu einem Arm eingeleitet.

Fig. 362 zeigt einen Schutzanzug über der gewöhnlichen Kleidung zu tragen (normale Ausführung), vorschrittmässig angelegt zum Gebrauch.

Schutz bei Bleiarbeiten.

246.
Blei-
ver-
giftungen.

Es ist vielfach behauptet worden, dass diejenigen Arbeiter, welche mit der häufigen Verlegung von Bleikabeln und der Herstellung von Anschlussstellen an denselben beschäftigt sind, Bleivergiftungen ausgesetzt seien. Zwar können solche Fälle nicht nachgewiesen werden, es ist aber immerhin eine gewisse Vorsicht geboten. Über die erforderlichen Massnahmen sei auf die Verfügung verwiesen, welche der Staatssekretär des Reichspostamtes zum Schutze der Telegraphenarbeiter gegen die Gefahr der Bleivergiftung an die Oberpostdirektionen ergehen liess:

„Von ärztlicher Seite war der Befürchtung Ausdruck gegeben, dass die mit dem Einziehen unbewehrter Telegraphen- und Fernsprechkabel beschäftigten Telegraphenarbeiter der Gefahr einer Bleivergiftung ausgesetzt seien, weil beim Durchgleiten der Kabel metallisches Blei an ihren Händen haften bliebe. Infolgedessen sind einzelne Oberpostdirektionen veranlasst worden, die Frage zu prüfen und nach Anhörung der Postvertrauensärzte die Notwendigkeit etwaiger Schutzmassregeln zu erörtern; auch haben sich auf Ersuchen mehrere Kabelfabriken zur Sache geäussert. Nach den eingegangenen Berichten ist bei den befragten Stellen zwar noch kein Vergiftungsfall beobachtet worden, obwohl besondere Schutzvorkehrungen nur in seltenen Fällen zur Anwendung gekommen sind; eine unmittelbare Gefahr scheint demnach mit der Handhabung der Kabel nicht verbunden zu sein. Andererseits steht es fest, dass bei ungeeignetem Verhalten der Arbeiter Schädigungen ihrer Gesundheit keineswegs ausgeschlossen sind. Den sichersten Schutz vor Erkrankungen gewährt den Kabelarbeitern die Sauberkeit, insbesondere dürfen sie niemals mit ungereinigten Händen Speisen zum Munde führen. Die Bauführer haben deshalb streng darauf zu achten, dass die Arbeiter eine gründliche Reinigung der Hände mit Seife und Bürste vor dem Essen und bei jeder sonstigen Unterbrechung der Arbeit vornehmen. Für Bereithaltung der nötigen Waschgeräte, einschliesslich der Seife, Bürste und Handtücher, ist auf Kosten der Postkasse Sorge zu tragen. Ferner ist den Arbeitern zu empfehlen, täglich Mund und Nase gehörig auszuspülen und zur Reinigung des ganzen Körpers von Zeit zu Zeit ein Vollbad zu nehmen, was sie auf eigene Kosten zu thun hätten. Um das Blei auch von den Kleidern fernzuhalten, thun die Arbeiter gut, waschbare Arbeitsanzüge oder Überkleider zu tragen. Das Rauchen, Schnupfen und Tabakkauen während der Arbeit erhöht die Gefahr und ist deshalb nicht zu dulden. Arbeiter mit Verletzungen an den Händen dürfen zum Einziehen der Kabel nicht verwendet werden.

Berührung ausgeschlossen ist. Montage- oder Reparaturarbeiten dürfen an solchen Anlagen oder Teilen von solchen erst dann in Angriff genommen werden, wenn der betreffende Teil, an dem gearbeitet werden soll, spannungslos gemacht und geerdet worden ist. (Ausnahmen siehe No. 67.)

63. Prüffelder oder Probierräume sind provisorische Anlagen, zu denen nur besonders beauftragten Leuten der Zutritt gestattet werden darf. Prüffelder unterliegen nicht den vorliegenden Bestimmungen.

64. Zur Kenntlichmachung und Abgrenzung der Prüffelder müssen Warnungstafeln und Wände, Gitter oder Geländer vorhanden sein.

B. Stromverbrauchsanlagen.

65. Bei Motoren, sofern sie nicht in Räumen stehen, die nur instruiertem Personal zugänglich sind, müssen die Spannung führenden Teile gegen zufällige Berührung geschützt sein.

66. Montage- oder Reparaturarbeiten an Hochspannung führenden Teilen des Leitungsnetzes und der Stromverbraucher sowie die Bedienung der Lampen in Hochspannungsstromkreisen ist nur nach vorheriger Ausschaltung und an der Arbeitsstelle selbst vorgenommener Erdung und Kurzschliessung zu gestatten. Wenn, wie beispielsweise bei Kabeln, eine vorherige Erdung unmittelbar an der Arbeitsstelle nicht ausführbar ist, so muss die Arbeit nach No. 67 ausgeführt werden, jedoch braucht der Betriebsleiter oder dessen Beauftragter die Arbeit nicht persönlich zu überwachen.

Die Handhabung von Schaltern, das Auswechseln von Sicherungen sowie in Bahnwagen das Auswechseln von Glühlampen sind nicht als Arbeiten im Sinne dieser Bestimmung zu betrachten, wenn diese Vorrichtungen gefahrlos vorgenommen werden können.

67. In unabweisbaren Fällen kann man das Arbeiten an Hochspannung führenden Teilen gestatten; doch ist es Pflicht des Betriebsleiters oder dessen Beauftragten diejenigen Schutzmassregeln anzuordnen, welche den örtlichen Verhältnissen entsprechend zur Sicherheit der Arbeiter nötig sind und die Arbeiter während der ganzen Arbeitszeit persönlich zu überwachen. Sind für solche Arbeiten Gerüste nötig, so finden die Einschränkungen des § 69 keine Anwendung.

Bei Arbeiten an Bahnleitungen, deren Spannung gegen Erde 1000 Volt nicht übersteigt, braucht der Betriebsleiter oder dessen Beauftragter die Arbeit nicht zu überwachen, wenn sie durch instruiertes Personal ausgeführt wird.

68. In jeder Betriebsstätte sind Vorschriften über die Behandlung von Personen, die durch elektrischen Strom betäubt sind, sichtbar anzubringen.

69. Das Aufbauen von Gerüsten in unmittelbarer Nähe von Maschinen und Wellenleitungen sowie von blanken Spannung führenden Drähten (bei Hochspannung auch von isolierten Drähten) darf nur vorgenommen werden, wenn sich die Maschinen und Wellenleitungen im Ruhezustand, die Drähte im spannungslosen Zustand befinden. Nach der Aufstellung kann der Betrieb der Maschinen, Wellenleitungen und elektrischen Leitungen wieder aufgenommen werden, sofern die Gerüste mit solchen Sicherheitsvorrichtungen versehen sind, dass niemand von laufenden Teilen erfasst, noch durch die zufällige Berührung eines Spannung führenden Drahtes beschädigt werden kann.

elektrischer Beziehung nötigen Schutzmittel genau auf ihre Sicherheit hin zu untersuchen und nicht Brauchbares zurückzuweisen oder brauchbar herzustellen, oder, wenn dies nicht möglich, dem Vorgesetzten sofort Anzeige davon zu machen.

78. Das Aufbauen von Gerüsten in unmittelbarer Nähe von Maschinen und Wellenleitungen, sowie von blanken Spannung führenden Drähten (bei Hochspannung auch von isolierten Drähten) darf nur vorgenommen werden, wenn sich die Maschinen und Wellenleitungen im Ruhezustand, die Drähte in spannungslosem Zustande befinden. Über die Herbeiführung dieses Zustandes und seine Erhaltung während der Aufstellung des Gerüstes hat sich der Arbeiter mit dem Betriebsleiter oder dessen Beauftragten zu verständigen. Nach der Aufstellung kann der Betrieb der Maschinen und Wellenleitungen und elektrischen Leitungen wieder aufgenommen werden, sofern die Gerüste mit solchen Sicherheitsvorrichtungen versehen sind, dass niemand von laufenden Teilen erfasst, noch durch die zufällige Berührung eines Spannung führenden Drahtes beschädigt werden kann.

Diese Vorschriften gelten nicht für die Aufstellung und Benutzung von Turmwagen und Leitern zur Vornahme von Betriebsarbeiten durch instruiertes Personal.

79. Bei Arbeiten auf Dächern, erhöhten Standpunkten, z. B. Plattformen, wo Schutzgeländer nicht angebracht werden können, muss sich jeder Arbeiter mittels Sicherheitsgurtes und Seiles gegen Herabfallen sichern.

80. Bei Erdarbeiten ist für gute Absteifung des stehenbleibenden Erdreichs und auch für Abgrenzung der Gruben zu sorgen.

81. Für den Transport haben sich die Arbeitnehmer nach den Vorschriften unter VII. zu richten.

Unglücksfälle.

248. Hieran anschliessend seien einige charakteristische, tödlich verlaufene **Zwei charakteristische Unfälle durch elektrische Schläge.** Unglücksfälle¹⁾ erwähnt, aus denen aber erkannt werden kann, wo die Installationstechnik einzusetzen hat, um eine grössere persönliche Sicherheit zu erzielen.

1. Auf dem v. ARNIMSchen Steinkohlenwerke zu Planitz bei Zwickau i. S. war eine Drehstromanlage von 500 Volt im Einbau begriffen und zum Teil vollendet. Eine kleine Schachtpumpe war bereits in Betrieb und auf Wunsch der Belegschaft waren an deren Leitung auf der betreffenden Sohle fünf Glühlampen zum Beleuchten des Füllortes und des anschliessenden Teiles des Füllortquerschlagcs angeschlossen worden. Hierzu dienten zwei an der Firste des Querschlagcs an Porzellanknöpfen verlegte, mit Kautschuk und Umspinnung isolierte Drähte von 1 $\frac{1}{2}$ mm Durchmesser. Da sich gezeigt hatte, dass man beim Berühren dieser Leitung eine Spur Strom fühlen konnte, so war eine besser isolierte Ersatzleitung bereits bestellt, aber noch nicht geliefert und eingebaut. Das Berühren der Leitung war den Arbeitern

1) Aus Dr. TH. ERHARD, Der elektrische Betrieb im Bergbau. Weitere Abhandlungen siehe ETZ 1895, S. 70, 758; 1896, S. 31; 1897, S. 615, 785; 1899, S. 503, 601, 728, 737; 1900, S. 133; 1901, S. 1028, 1073; 1903, S. 87; 1904, S. 32. ERLACHER, Elektrische Apparate, Hannover 1903, S. 94.

wurden, brennen gelassen, aus welchem Grunde die Kontaktleitung der Lokomotivanlage unter Spannung bleiben musste. Obwohl die Leitung nur 1.63 m über dem Fussboden lag, also von den Stössern bei der Arbeit leicht berührt werden konnte, sah man hierin nichts Bedenkliches, da bereits häufig genug die blanken Kontaktleitungen berührt worden waren, ohne dass die betreffenden Leute Schaden genommen hätten. Es setzte sich nun einer der Häuer bei diesem Betrieb in einen eisernen Förderwagen und liess sich mit ihm vorwärts stossen. Als der Wagen zum Stillstand gekommen war, erhob sich der Häuer, um auf einen gefüllten, auf einem benachbarten Gleis stehenden Wagen hinüberzuklettern. Hierbei hat er wahrscheinlich mit dem Halse die Kontaktleitung berührt, während er gleichzeitig mit seinen Händen sich fest auf die Wand des eisernen Wagens stützte. Die Folge war ein so heftiger Schlag, dass er zu Boden fiel und nach kurzer Zeit verstarb. Die Ursachen dieses bedauerlichen Unfalls müssen in Folgendem gesucht werden:

Es ist zunächst zu betonen, dass erfahrungsgemäss die Disposition eines vom elektrischen Schlage Betroffenen für die Folgen des Schlages eine besonders wichtige Rolle spielt. Die Einwirkung des elektrischen Schlages auf den Menschen besteht in erster Linie darin, dass die Nerven einen starken Reiz empfangen und wie durch Schreck ihre Thätigkeit einstellen. Besonders gefährlich ist diese Einwirkung natürlich bei denjenigen Nerven, welche die Herz- und Lungenthätigkeit beeinflussen. Hört die Funktion dieser Nerven auf, so ist auch die Thätigkeit des betreffenden Organs, Herz oder Lunge, eingestellt.

Die Reizbarkeit der Nerven, ihre Empfindlichkeit gegen elektrische Schläge, ist bei den einzelnen Menschen sehr verschieden. Alkoholiker sind erfahrungsgemäss gegen elektrische Schläge besonders empfindlich. Möglicherweise spielt auch der Umstand, ob der Mensch kurz vorher in besonderem Masse Alkohol genossen hat, bei den Folgen des elektrischen Schlages eine Rolle.

Bei dem in Rede stehenden Falle lässt der über die Sektion des getöteten Häuers vorliegende Bericht darauf schliessen, dass er mehr oder weniger stark Alkoholiker gewesen ist und daher gegen elektrische Schläge empfindlicher als andere Menschen war.

Was weiter die in Rücksicht zu ziehenden elektrischen Verhältnisse bei diesem Unfall betrifft, so ist, wie in der oben erwähnten Abhandlung auch des näheren ausgeführt wurde, davon auszugehen, dass es hinsichtlich der Folgen eines elektrischen Schlages in erster Linie auf die Stromstärke ankommt, die den menschlichen Körper durchflossen hat. Diese Stromstärke ist bei einer gegebenen Netzspannung E von dem Gesamtwiderstand des in Frage kommenden Stromkreises, in welchen der Mensch geschaltet ist, abhängig und kann ausgedrückt werden durch die Formel

$$J = \frac{E}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4}.$$

Hierbei bedeutet:

E = Netzspannung,

W_1 = Isolationswiderstand des nicht berührten Pols gegen Erde,

W_2 = Übergangswiderstand vom berührten Pol zum Körper,

W_3 = Widerstand des Körpers,

W_4 = Übergangswiderstand vom Körper zur Erde.

Welche Räume sind nun als feuergefährlich, welche als explosionsgefährlich aufzufassen?

Wohl geben die Sicherheitsvorschriften Definitionen für diese Räume, die indessen Missdeutungen nicht ausschliessen.¹⁾ Als feuergefährlich bezeichnet Dr. C. L. WEBER²⁾ Schreinerwerkstätten, Sägewerke, Baumwollspinnereien. Nach den Vorschriften (§ 3 g) sind dies also Räume, in denen leicht entzündliche Gegenstände erzeugt oder angehäuft werden. Die näheren Bedingungen für die Installation in derartigen Räumen giebt dann § 39 (feuergefährliche Betriebsstätten) und § 44 (Schaufenster, Warenhäuser und ähnliche Räume, in welchen leicht entzündliche Stoffe aufgestapelt sind) der Sicherheitsvorschriften.

Es ist nun zu beachten, dass der Verband nicht ganze Betriebe als feuergefährlich bezeichnet, sondern bei jedem einzelnen Raum untersucht wissen will, ob derselbe als ein feuergefährlicher zu gelten hat oder nicht.

Als Kriterium der Feuergefährlichkeit eines Raumes bezeichnet die Definition § 39, dass darin „leicht entzündliche Gegenstände erzeugt oder angehäuft werden“. Es sind also die Teile dieses Kriterium getrennt zu prüfen:

1. Unter der „Erzeugung“ von leicht entzündlichen Gegenständen ist jede Zustandsänderung zu verstehen, welche an den betreffenden Gegenständen vorgenommen wird, also auch z. B. die Verpackung.

2. Unter der „Anhäufung“ versteht man die Vereinigung einer für die vorliegenden Verhältnisse wesentlichen Menge der betreffenden Gegenstände. (Eine Schachtel Zündhölzer ist also noch keine Anhäufung.) Das Vorhandensein unwesentlicher Mengen leicht entzündlicher Gegenstände in einem Raume bietet also noch keine Veranlassung zur Anwendung verschärfter Installationsvorschriften.

Sind Vorkehrungen getroffen, welche verhüten, dass sich leicht entzündliches Material in wesentlichen Mengen im betreffenden Raume ansammeln kann, so wird eine häufige Reinigung die Feuergefährlichkeit des Raumes wesentlich herabsetzen. So wird z. B. in modernen Holzbearbeitungsfabriken der Holzstaub und die Späne unmittelbar an den Maschinen unter Benutzung kräftiger Ventilatoren abgesaugt, so dass sich leicht entzündliches Material überhaupt nicht ansammeln kann und der Begriff der Feuergefährlichkeit für derartige Räume nicht zutrifft.

Handelt es sich um staub- oder gasförmiges Brennmaterial, so spielt speziell die Häufigkeit und Gründlichkeit der Lüftung eine bedeutende Rolle. Man wird eine auf einer Seite völlig offene Halle nicht als ebenso feuergefährlich betrachten, falls darin Staubkohle, Getreide oder Benzin in Ballons lagert oder verarbeitet wird, wie einen geschlossenen Raum. Eine kräftige künstliche Ventilation, die betriebssicher und dauernd arbeitet, hat ähnlichen Einfluss.

3. Die Eigenschaft, „leicht entzündlich“ zu sein, ist bei einem Gegenstand von verschiedenen Umständen abhängig, und zwar:

a) Von dem Material des Gegenstandes: Der Gebrauch der Praxis unterscheidet zwischen „brennbarem“ und „nicht brennbarem“ Material.

1) Vgl. ETZ 1903, S. 142.

2) Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften, 7. Aufl., S. 29.

durch eine äussere Entzündungsquelle. In massiven Stücken, welche eine im Vergleich zu der entzündenden Wärmequelle hohe Abkühlungsfläche besitzen und andererseits dem Sauerstoff der Luft nur an den Aussenflächen Zutritt bieten, erfolgt eine Fortpflanzung der Entzündung unter ungünstigeren Bedingungen als in kleinstückigem, lockerem, staubförmigem oder gar gasförmigem Material. Z. B. sind Eichenklötze viel weniger entzündlich als Sägespäne, Stückkohle weniger als Kohlenstaub, Körner weniger als Mehl.

- f) Die Art der Verpackung und Packung spielt in Lagerräumen gleichfalls eine bedeutende Rolle. Werden z. B. Phosphorvorräte unter Wasser gelagert, so sind sie nicht mehr leicht entzündlich, oder wenn Hopfen ausschliesslich in der üblichen Überseeverpackung — grosse Trommeln aus 3—4 mm dickem Eisenblech mit Eisenrippen und luft- und wasserdichten Eisenverschlüssen — lagert, kann er für den vorliegenden Zweck nicht als leicht entzündlich gelten, wenn auch sonst gedarrter, geschwelter Hopfen sehr leicht entzündlich ist.

Auch diejenigen Verpackungsarten, bei denen das Material sehr fest zusammengepresst wird, vermindern je nach der Innigkeit der dadurch erzeugten Vereinigung der kleinen Teile die Entzündlichkeit. So sind Torfmüllballen, die unter hydraulischem Druck oder unter der Dampfpresse zusammengepackt werden, schwer entzündlich. Gut gepresste Hopfensäcke sind nicht so hoch entzündlich als lose lagernde Haufen Zeitungspapier auf den üblichen grossen Rollen, von der Maschine ausgerollt, ist fast nicht zu entzünden, weil es ein massives Ganzes bildet ebenso dicht gestapelte Papierballen oder Wollballen. Es ist bekanntlich fast unmöglich, alte Akten durch Feuer zu vernichten.

Weiter von Einfluss auf die Entzündlichkeit ist die Temperatur, welche die betreffenden Materialien besitzen. Es ist möglich, dass entweder die Aussentemperatur im betreffenden Raume infolge der Betriebsverhältnisse eine abnormal hohe ist oder dass das Material selbst eine höhere Eigen Temperatur als die Aussenluft besitzt, sei es, dass es direkt vorgewärmt wurde oder sich durch die Art der Bearbeitung stark erhitzt hat. In all diesen Fällen ist die Entzündlichkeit eine erhöhte.

Von einigem Einfluss ist auch der spezifische Bedarf an Verbrennungsluft,¹⁾ der dem betreffenden Material eigentümlich ist.

Wichtig ist jedoch die Dauer der Entzündung, d. h. die Menge der geführten Wärme, denn es muss ein gewisses Quantum des Materials die Entzündungstemperatur gebracht werden, damit die Entzündung fort pflanzungsfähig ist. Dieses Quantum ist um so kleiner, je kleinstückiger Material ist. Staubbörmiges Material kann durch ganz kurzdauernde Erwärmung entzündet werden. Grobes Material kann durch eine sehr heftige aber kurzdauernde Erhitzung nicht entzündet werden (kalte Blitzschläge).

Aus Vorstehendem ist ersichtlich, dass die Entzündlichkeit eines Materials keineswegs eine Konstante desselben ist, sie ist vielmehr eine Funktion einer ganzen Reihe von Umständen. Die Verbandsvorschriften sprechen halb auch nicht von entzündlichem Material, sondern von entzündlichen Gegenständen.

1) Vgl. HÜTTE, Teil I, S. 338, 18. Aufl.

Es ist ersichtlich, dass den hohen Temperaturen der ersten Quelle als gefahrmindernd deren kurze Dauer (selbstverständlich nur bei normalem Betrieb) gegenübersteht, so dass brennendes Isoliermaterial die gefährlichste Entzündungsquelle bilden dürfte.

Aus diesen Erwägungen ist aber Folgendes zu entnehmen:

Unter leicht entzündlichen Gegenständen im Sinne der §§ 39 und 44 der Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker sind solche zu verstehen, welche schon durch kleine elektrische Lichtbogen, kurzdauernde kleine elektrische Funkenentladung, durch herausfallende Teilchen von Bogenlampenkohlen oder durch brennende und glimmende Teile der Drahtisolierung eine fortpflanzungsfähige Entzündung unter den im jeweilig vorliegenden Falle herrschenden Verhältnissen erfahren können.

Leicht entzündliche Gegenstände sind nun zwar fast in jedem Raum vorhanden, z. B. Gardinen, Streichhölzer u. s. w.

Die §§ 39 und 44 beschränken deshalb mit Recht ihr Geltungsbereich auf solche Räume, wo derartige leicht entzündliche Gegenstände verarbeitet oder angehäuft werden (§ 3 g der Vorschriften).

250.
Welche
Räume sind
als ex-
plosions-
gefährlich
aufzufassen?

Als explosionsgefährlich gelten Räume, in denen explosible Stoffe aufgespeichert werden oder in denen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Staub oder Fasern bilden oder anhäufen können (§ 3 h).

Anm. 11 der Erläuterungen von Dr. C. L. WEBER hierzu lautet: Hierher gehören gewisse Teile von Getreidemühlen, Lagerräume für Spirituosen u. s. w. Die Explosionsfähigkeit von Mehl, Staub und ähnlichen Stoffen ist neuerdings wieder durch Versuche festgestellt worden. Ein Raum, der mit einer Gasleitung ausgestattet ist, wird dadurch noch nicht zu einem explosionsgefährlichen; wenn hier auch die Bildung explosibler Gemische durch Austritt des Gases nicht völlig ausgeschlossen ist, so kann sie doch nur durch grobe Fahrlässigkeit oder unsachgemässe Beschaffenheit der Gasleitung eintreten, wird also niemals „betriebsmässig“ vorkommen. Es sei indessen darauf hingewiesen, dass namentlich die Räume, in denen Gasuhren aufgestellt sind, eine besondere Beachtung verdienen. Wenn sie auch im Sinne dieser Vorschriften nicht als explosible Räume gelten, so ist doch einige Vorsicht in ihrer Behandlung und bei ihrer Ausrüstung mit elektrischen Einrichtungen geboten.

§ 40 behandelt dementsprechend „explosionsgefährliche Betriebsstätten und Lagerräume“.

Anm. 1 lautet: Was als explosionsgefährlicher Raum zu betrachten ist, muss von Fall zu Fall je nach Art des Betriebs und der vorkommenden Stoffe entschieden werden. Es gehören hierher Sprengstofffabriken, gewisse Teile von Gasfabriken, Benzinwäschereien, unter Umständen auch Getreidemühlen, Baumwollspinnereien und dergl.

Auch hier werden nicht ganze Betriebe, sondern einzelne Räume betrachtet und jeweilig als explosionsgefährlich bezeichnet.

Die Definition spricht also erstens von „explosiblen Stoffen“ und zweitens von „explosiblen Gemischen von Gas, Staub oder Fasern“.

Unter explosiblen Stoffen sind diejenigen stofflichen Verbindungen oder Gemenge verstanden, welche das Sprengstoffgesetz vom 9. Juni 1884 als „explosive Stoffe“ bezeichnet (die Ausnahmen, die dieses Gesetz gestattet, sind also hier nicht vorgesehen).

gefährlicher Raum, denn die explosiblen Gemische werden dortselbst weder aufgespeichert, noch können sie sich anhäufen.

Die Definition verlangt jedoch weiter, wenn ein Raum als explosionsgefährlich gelten soll, dass sich derartige explosible Gemische „betriebsmässig“ bilden oder „anhäufen“ können. Infolge grober fahrlässiger Handlungen kann sich nämlich ein derartiges explosives Gasgemisch z. B. in jedem Zimmer bilden, in dem Leuchtgasleitungen liegen. Trotzdem ist ein solcher Wohnraum dieserhalb noch kein explosionsgefährlicher Raum.

Nur wenn bei der gewöhnlichen Betriebsführung die Möglichkeit vorliegt, dass sich explosible Gemische bilden oder anhäufen, kann der betreffende Raum als explosionsgefährlich schlechtweg gelten.

Es sind also wesentliche Merkmale der Explosionsgefährlichkeit von Räumen die Vorbedingungen, von denen die Bildung oder Anhäufung des explosiblen Gemisches abhängt. Ist nur ein rein zufälliges Zusammentreffen gewisser Vorbedingungen erforderlich, so handelt es sich um einen explosionsgefährlichen Raum im Sinne des § 40.

Sind jedoch besondere Vorbedingungen erforderlich, die aber im Bereiche fahrlässiger Handlungen liegen, so handelt es sich um einen „bedingt explosionsgefährlichen Raum“.

Die bedingt explosionsgefährlichen Räume finden sich fast nur in chemischen Betriebsstätten und sind neuerdings in § 47 der Verbandsvorschriften einer besonderen Behandlung unterzogen worden.

Sind dagegen grobe fahrlässige Handlungen, absichtliche Sachbeschädigungen oder elementare Ereignisse (Erdbeben, Hauseinsturz, Wirbelstürme u. s. w.) erforderlich, um die Bildung oder Anhäufung explosibler Gemische zu ermöglichen, so ist der Raum nicht mehr als explosionsgefährlich zu betrachten.

Hierzu seien noch einige Beispiele angeführt.

Eine Mahlmühle,¹⁾ welche mit offenen Maschinen arbeitet, wird bei ungünstigen örtlichen Verhältnissen explosionsgefährliche Räume enthalten, da sich der Mehlstaub entzünden kann. Ist die Mühle dagegen mit modernen, von oben bis unten geschlossenen Gängen ausgestattet, so ist eine Mehlstaubansammlung in der Luft überhaupt nicht möglich und es ist keine Explosionsgefährlichkeit, wahrscheinlich auch keine Feuergefährlichkeit vorhanden.

Wird in einem Raum offen Benzin oder Petroleum abgefüllt, so kann sich ein explosives Gemisch ansammeln, wenn nicht für eine geeignete Abführung der Gase gesorgt ist. Legt man dagegen die Petroleum- oder Benzintanks unter die Erdoberfläche und entlüftet sie durch geeignete Ventilationsanlagen, so kann, selbst wenn in darüber gelegenen Räumen die Flüssigkeit stets abgefüllt wird, von einer Explosionsgefährlichkeit nicht die Rede sein, wenn die Abfüllvorrichtungen so gebaut sind, dass ein Verschütten der Flüssigkeit in grösseren Mengen ausgeschlossen ist. Dies ist aber bei den modernen Abfüllstationen stets der Fall.

Dass im übrigen die Abführung gasiger Gemische und Zuführung frischer Luft die Explosionsgefährlichkeit eines Raumes aufhebt, beweist der Umstand, dass in Schlagwettergruben die Aufstellung von elektrischen Apparaten u. s. w. gestattet ist, wenn sie im einziehenden Wetterstrom liegen.

1) Vgl. auch ETZ 1905, S. 129.

Zur Notbeleuchtung sind Kerzen in Laternen, Rüböllampen oder solche elektrische Lampen, welche durch eine besondere Betriebsquelle gespeist werden, zu verwenden. Auf die Notbeleuchtung finden die vorstehenden Sicherheitsvorschriften sinngemässe Anwendung.“

Bezüglich der Schaufenster sei an die Verfügung des Polizeipräsidenten von Berlin erinnert. Hdb. VI, S. 306.

252.
Theater-
anlagen.

„Sonderbestimmungen für Theater sind,“ wie Dr. WEBER in seinen Erläuterungen sagt, „aus zwei Gründen notwendig, zunächst, weil es sich um grosse Menschenmengen handelt, für die nicht nur die unmittelbare Brandgefahr, sondern auch die aus einer Panik entstehenden Folgen zu fürchten sind. Zum anderen, weil in Theatern, besonders im Bühnenraum, verhältnismässig grosse Lichtmengen, auf engem Raum zusammengedrängt, gebraucht werden und dieser Gebrauch behufs Erzielung der Bühnenwirkungen ein eigenartiger ist, der die elektrische Einrichtung in besonders hohem Masse beansprucht. Namentlich sind mechanische Beschädigungen durch die Bewegung der Beleuchtungskörper selbst, sowie durch die Bewegung der Bühnenrequisiten und der Personen zu befürchten.“

Ebenso wie Theater sind in der Regel auch Zirkusgebäude, Konzertsäle, Ballsäle, Häuser für Variétévorstellungen und ähnliche Zwecke zu behandeln. Eine Abgrenzung ist nur unter Würdigung der Betriebsart von Fall zu Fall möglich.“

253.
Massnahmen
zur Herbeiführung
grösserer
Feuersicherheit in der
Installation.

Im einzelnen wären nun noch diejenigen Massnahmen zu besprechen, welche eine Feuersgefahr durch die elektrische Anlage ausschliessen sollen.

Elektrischen Maschinen wohnt, trotz ihrer geringen räumlichen Ausdehnungen, ganz gewaltige Energie inne, die, durch irgend welche Fehler in falsche Bahnen geleitet, sich in Wärme umsetzt und zündend wirkt. Aber nicht nur in aussergewöhnlichen Fällen können elektrische Maschinen und Apparate eine Gefahr für eine leichtentzündliche Umgebung bilden, da ja an vielen Apparaten normalerweise Funken auftreten. Es ist daher stets dafür Sorge zu tragen, dass diese Feuererscheinungen brennbare Stoffe nicht erreichen können. Dass daher in feuer- oder explosionsgefährlichen Räumen derartige Maschinen und Apparate nicht ohne weiteres, sondern eingekapselt oder mit Schutzkästen umgeben, aufgestellt werden dürfen, ist selbstverständlich, ebenso muss für genügende Reinhaltung der Maschinen und Apparate im Betrieb Sorge getragen werden. — Die Einkapselung der Motoren hat indessen auch seine Schattenseiten, da grössere Typen Verwendung finden müssen, und Schutzkästen haben sich als Staubbänger herausgestellt und das Übel vergrössert. Es müssen also auch hier die örtlichen Verhältnisse recht sehr in Betracht gezogen werden.

Aber auch an anderen Stellen muss für eine genügende Sicherheit durch die Montage auf feuersicherer Unterlage, durch Zwischenlegen hitzebeständiger Materialien und genügende Abstände gesorgt werden. So sind die Widerstände der Bogenlampen, Drosselspulen, Transformatoren stets in einigem Abstand von der Wand zu montieren. Schalter müssen so angeordnet sein, dass die Drähte nie an die Wand gepresst werden.

In Akkumulatorenräumen liegt die Möglichkeit einer Entzündung des bei der Ladung entstehenden Knallgases vor. Zu diesem Zeitpunkt dürfen also brennende oder glühende Körper im Akkumulatorenraum nicht geduldet werden, so dass also auch Reparaturarbeiten (Löten) ausgeschlossen sind. Wie gering indessen die Gefahr einer Entzündung ist, beweist der Umstand,

Durch die Normalien des Verbandes wurde dann aber ein Leitungsmaterial vorgeschrieben, welches sich auch bei der erhöhten Spannung anstandslos hält, und zwar wird nunmehr, wo Schnurleitungen verwendet werden, ausnahmslos mit Gummi umpresstes Material verwendet.

Die eigentliche Gefahr dieser Installation mit den vorher erwähnten schlechten Schnurleitungen lag nun keineswegs in Kurzschlüssen, die die Sicherungen in Tätigkeit gesetzt hätten, sondern in schleichenden Kurzschlüssen, die in Schalter- und Umschalterleitungen auftraten, wodurch die Sicherungen nicht durchschmelzen konnten.

Aus Fig. 365 ist ohne weiteres ersichtlich, dass bei einem Kurzschluss zwischen den Leiterteilen 1 und 2 bzw. 3, also an den Stellen *A* oder *B* der Verbrauchsapparat, in der Figur eine Glühlampe, kurzgeschlossen wird und infolgedessen ein energischer Kurzschlussstrom auftritt. Zwischen 2 und 3, also bei *C* wird dagegen nur der Schalter kurzgeschlossen, der Strom kann die Höhe des Verbrauchsstromes nicht überschreiten und es bildet sich

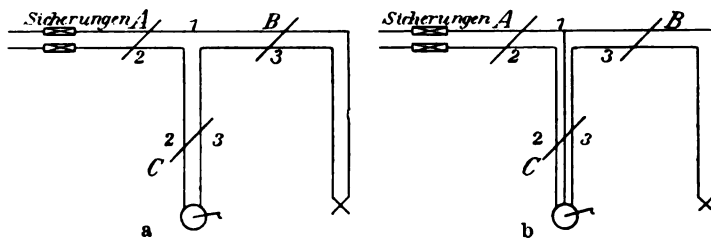


Fig. 365.

an dieser Stelle ein Lichtbogen, der die Isolierung in Brand setzen und in der Nähe befindliche brennbare Stoffe entzünden kann. Die Schalterleitung brennt nun von unten nach oben, die Sicherungen treten aber erst dann in Tätigkeit, wenn auch die Isolierung der Leitung 1 zerstört wird. Durch die Verwendung der vorerwähnten besser isolierten Leitungen sind nun an und für sich diese Gefahren ausgeschlossen, ebenso durch das Einziehen der Schalterleitungen in Rohre, die sowieso durch § 26 b der Sicherheitsvorschriften verlangt werden. CONINX giebt nun an der bereits citierten Stelle eine Sicherheitschaltung an, die in Fig. 365 b erläutert ist. Die Leitung 1 wird nämlich mit 2 und 3 zusammen verseilt zum Schalter geführt, ohne jedoch selbst am Schalter angeschlossen zu werden. Tritt ein schleichender Kurzschluss zwischen 2 und 3 ein, so wird durch den hierbei entstehenden Lichtbogen die Isolierung der Leitung 1 ebenfalls angegriffen und sofort ein energischer Kurzschluss eingeleitet, der die Sicherungen in Tätigkeit setzt und die gefährdete Leitung stromlos macht. Es sei hierbei daran erinnert, dass die in der Praxis übliche und gern angewendete Verlegung zweier Leiter verschiedenen Potentials in dasselbe Rohr aus denselben Gründen erfolgt.

Durch geeignete Wahl des Leitungsmaterials, der Isolierung, der Schutzvorrichtungen u. s. w. wird aber auch hier die Feuersicherheit verbürgt.

255.
Entflamm-
barkeit von
Schnur-
leitungen.

Dass im übrigen eine Entflammbarkeit der Leitungen durch den elektrischen Strom bei gewissenhafter Berücksichtigung der Sicherheitsvorschriften nur bei sehr hohen Belastungen möglich ist, zeigt eine Arbeit¹⁾ von HERZOG & FELDMANN, der das Folgende entnommen ist.

1) ETZ 1904, S. 213.

stromes, hier also 8 Amp., bemessen werden, in der Weise, dass dieselben bei dieser Stromstärke in 2 Minuten abschmelzen. Aus der Kurve bzw. dem Versuche geht hervor, dass aber in Wirklichkeit die Leitungsschnur selbst bei dem Vierfachen dieser Schmelzstromstärke innerhalb der 2 Minuten nicht in Brand gerät, vielmehr erwärmt sich dieselbe bei dauernder Belastung von 20 Amp. um 70 bis 80° C. Würde also statt der 4 Ampere-Sicherung eine solche für 10 oder 16 Amp. eingesetzt werden, so müssten diese in 2 Minuten bei 20 bzw. 32 Amp. durchschmelzen, ohne dass ein Brand der Leitung entstände. Es folgert hieraus, dass die infolge Kurzschluss in einer Leitung auftretenden Ströme, auch wenn sie den normalen Betriebsstrom wesentlich überschreiten, keinesfalls imstande sein können, die Isolation der Leitungsschnur ihrer ganzen Länge nach zu entzünden.

Tritt aber eine örtliche Entflammung ein, hervorgerufen durch beschädigte Isolation infolge herausgetretener einzelner Kupferdrähte oder anderer Umstände, so dass hierdurch ein elektrischer Lichtbogen hervorgerufen wird, so ist selbstverständlich nur eine relativ geringe Stromstärke notwendig, um einen derartigen Kurzschluss hervorzurufen. Die Sicherung kann hierbei ganz unversehrt bleiben, und man kann sich gegen derartige Übel nur durch Verwendung guter Leitungen und sachgemässe Installation schützen. Das Verknoten der Leitungen, Anstecken derselben mittels Stecknadeln, Aufhängen an Nägeln und Anwendung ähnlicher Kunstgriffe wird daher mit Recht durch die Bestimmung der Sicherheitsvorschriften unmöglich gemacht, da in Auslagen u. s. w., die leicht entzündbare Stoffe enthalten, Leitungen unbeweglich in Röhren verlegt werden müssen.

256.
Elektrische
Anlagen als
angebliche
Verursacher
von
Bränden.

Nun gehen in gewissen Interessentenkreisen die Ansichten über die Feuersicherheit oder die Feuergefährlichkeit einer elektrischen Anlage weit auseinander. Im ersten Stadium der Elektrotechnik wurde zwar den elektrischen Anlagen eine derartige Sicherheit nachgerühmt, dass sie in besonders ungünstigen Fällen jeder anderen Beleuchtung vorgezogen wurden; es zeigte sich aber zunächst, dass sich dieses Vertrauen noch nicht rechtfertigte, da die Art der Installation, dazu die unzuverlässig wirkenden Sicherungen keineswegs einen sicheren Zustand herbeiführten, vielmehr Zustände schuf, die nach unseren heutigen Begriffen sogar als feuergefährlich bezeichnet werden müssen. Dies wurde aber die direkte Veranlassung, die Installationstechnik besser auszubilden, tüchtige Kräfte heranzubilden, so dass mit Fug und Recht behauptet werden kann, die heutige Installationstechnik ist unstrittig in der Lage, Anlagen zu bauen, welche die grösstmögliche Gewähr gegen Feuerschäden bieten. Sie wird dabei unterstützt durch eine überaus reiche Auswahl der zuverlässigsten Apparate.

Trotzdem wird aber, meist von Feuerversicherungsgesellschaften, behauptet, dass verhältnismässig viele Brandfälle auf die elektrische Installation zurückzuführen seien, womit dann eine Erhöhung der Prämien begründet wird. Dabei ist aber auffällig, dass noch keine einzige der Feuerversicherungsgesellschaften bisher eine Statistik darüber veröffentlicht hat. Auch sind die Gesellschaften im Begriff, neue Bedingungen aufzustellen, welche die Besitzer elektrischer Installationen insofern berühren, als sie vom Schadenersatz die elektrischen Installationen ausschliessen, wenn sie nachweislich die Ursache des Brandes gewesen sind. Als Begründung wird angeführt, dass die Gesellschaften nicht für die Beschaffenheit der elektrischen Apparate verantwortlich gemacht werden könnten, denn durch schlechte Lieferungen können

abschaltet. An anderer Stelle wird sogar eine sogenannte Sicherheitsschaltung empfohlen, welche bezweckt, im Falle der Beschädigung einer zu Schaltern führenden Litzenleitung einen schleichenden Kurzschluss zu vermeiden und an seine Stelle einen energischen Stromübergang von einem Pol zum anderen herbeizuführen.

257.
Massregeln
bei Bränden
des Ver-
bandes
Deutscher
Elektro-
techniker.

Wichtig ist noch die Frage, was zu geschehen habe, wenn in einem Gebäude, in welchem sich eine elektrische Anlage befindet, Feuer ausbricht.¹⁾ Nach Vorschlägen von Dr. OSKAR MAY hat der Verband Deutscher Elektrotechniker hierfür die nachstehend wiedergegebenen Massregeln aufgestellt:

Massregeln bei Bränden.

Bei ausbrechenden Bränden sind an den elektrischen Installationen in den vom Brande betroffenen oder bedrohten Räumen folgende Massregeln zu empfehlen:²⁾

A. Betriebsanlagen.

1. In vom Feuer betroffenen oder unmittelbar bedrohten elektrischen Betriebsanlagen ist der Betrieb durch das Betriebspersonal einzustellen. Das Eingreifen von mit dem betreffenden Betriebe nicht vertrauten Personen ist unzulässig.

2. Die Apparate sind so weit als möglich vor Löschwasser zu schützen.

3. Sind die Betriebsanlagen, welche zur Erzeugung von elektrischem Strome dienen, nicht unmittelbar vom Feuer bedroht, dann ist der Betrieb thunlichst aufrechtzuerhalten.

B. Installationen.

1. Alle Lampen in den vom Feuer betroffenen oder bedrohten Räumen sind — auch bei Tage — einzuschalten. Sie leuchten im Gegensatze zu allen anderen Beleuchtungsmitteln auch in raucherfüllten Räumen weiter und sind daher zur Erleichterung von Rettungsarbeiten unentbehrlich. Die Leitungen dürfen daher nicht abgeschaltet werden.

2. Vom Feuer bedrohte Elektromotorenbetriebe sind durch die damit betrauten Personen einzuschalten. Das Eingreifen von mit den betreffenden Betrieben nicht vertrauten Personen ist unzulässig.

3. Die Lösch- und Rettungsarbeiten der Feuerwehr sind ohne Rücksicht auf die elektrischen Installationen vorzunehmen. Nur soll das Be-

1) Dass im übrigen die Gefahr für die Feuerwehr beim Anspritzen stromdurchflossener Drähte nicht besonders gross ist, ist erwiesen (siehe ETZ 1903, S. 478); ausserdem ist das Anspritzen zu vermeiden, „weil es meistens nichts nützt, dagegen Kurzschlüsse herstellt und die Isolation verdirbt. Als geeignetes Löschmittel wird ausser trockenem Sand flüssige Kohlensäure in besonderen für Löschzwecke hergestellten Apparaten vielfach empfohlen.“ (Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Starkstromanlagen, herausgegeben von der Vereinigung der Elektrizitätswerke.)

2) Diese Ratschläge beziehen sich nur auf Gebrauchsinstallationen. Die an Freileitungen der Elektrizitätswerke in Brandfällen vorzunehmenden Massregeln sind nach den speziellen Verhältnissen vom Elektrizitätswerke mit der Feuerwehr zu vereinbaren.

genommen, das andere Mal mit solchem, dem absichtlich 0·5 % Soda zugesetzt war, um die Leitungsfähigkeit zu erhöhen. Die festgestellten Spannungen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle No. 22.

Entfernung zwischen Mundstück u. Leitung mm	Spannung 125 Volt		Spannung 240 Volt		Spannung 550 Volt		Spannung 6000 Volt	
	Reines Leitungs- wasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz	Reines Leitungs- wasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz	Reines Leitungs- wasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz	Reines Leitungs- wasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz
30	19	55	—	—	87	440	—	—
50	6	47	42	122	80	416	—	—
100	4	33	20	92	44	348	130	—
150	3	25	—	—	34	260	—	—
200	—	20	8	67	25	200	55	1000
300	—	15	5	47	18	146	20	900
400	—	12	4	43	12	—	15	800
500	—	10	3	36	5	66	—	238
750	—	6	1	24	1	48	10	100
1000	—	3	—	19	1·5	37	5	110
1250	—	—	—	14·5	—	28	—	65
1600	—	—	—	—	—	20	—	40
2000	—	—	—	—	—	10	—	12
2500	—	—	—	—	—	5	—	—
3000	—	—	—	—	—	—	—	—

Sachregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

Abbinden der Leitungen an Rollen 249.
Abdeckung von Kabeln, durch Eisen 102;
durch Thonröhren 91, 96; durch Cement 91, 300; durch Holz 96, 97; durch Backsteine 85. 91.
Abschaltung von Hochspannungsleitungen 366.
Abschmelzstrom bei Sicherungen 333.
Abspanndrähte, Isolierung 201; für Freileitungen 357.
Abspannstützen 141.
Abstände zwischen Stark- und Schwachstromleitungen mit Rücksicht auf Telefonstörungen 220.
Abtrieb der Leitungen 133, 134.
Abzweigdosen, für Gipskanäle 259; für Hartgummirohre 260; für Papierrohre 265; für Stahlrohre 279.
Abzweigkasten an Bord 317; für Stahlrohr 280.
Abzweigmuffen, in Muffen 52; von Sowerbuts 68; Siemens-Schuckert Werke 72; Hartmann & Braun A.-G. 74; für Schalterleitungen 74; für Schnurleitungen 74.
Abzweigmuffen (s. a. Muffen) für konzentrische Kabel 50; von Siemens Brothers 50; der Allg. Elektr.-Gesellschaft 50; der Land- und Seekabel-Werke 50; der Süddeutschen Kabelwerke 50; Montage 52; mit Sicherungen 52; mit Sicherungen der Allg. Elektr.-Gesellschaft 52; für Isolierrohre ohne besonderen Schutz 261; für Isolierrohre mit Messingmantel 263; für Hausanschlüsse 290.
Abzweigscheiben für die Rohrverlegung 268.
Abzweigungen, von Drähten 67; beim System der Conc. Wiring Co. 273; an Bord von Schiffen 316.
Adlervitriol 121.

Ätzende Dünste, Installation in Räumen enthaltend — 300.
Akazienholz für Isolatorenstützen 149.
Akkumulatorenräume, Leitungsverlegung 249; Bergwerksisolatoren, Rollen in — 300; Lüftung 331, 335; Erdschluss in — 341, 354; persönliche Sicherheit 353; Bleivergiftung 354; Unfallverhütungsvorschriften 377, 379; Massnahmen zur Erzielung von Feuersicherheit 392.
Aluminium 152, 196, 204; Vergleich mit Kupfer 153.
Aluminiumleitungen, Verbindung von — 67; Durchhang 137.
Amerikanische Fernleitungen 147. 196.
Anker für Maste 200.
Ankerdrähte an Gebäuden 201.
Anspritzen der Leitung durch die Feuerwehr 398, 399.
Anstrich der Schalttafelleitungen 30; von Freileitungen 152; von Kabeln in Bergwerken 308; der Maste 118, 122.
Anweisung für das Betriebspersonal, herausgegeben von der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik 334; in durchtränkten Räumen 363.
Antrieb von Schaltern in Schaltanlagen 21.
Apparate in Freileitungen 203, 357.
Apparatebezeichnung an Schalttafeln 5.
Apparateschutz an Schaltanlagen durch Glastafeln 5, 7.
Arbeiten, an Transformatoren 353; in elektrischen Anlagen während des Betriebes 365; an Freileitungen 368, 398.
Aufstellung, von Maschinen, nach dem System von Thury 352; isolierende und geerdete Aufstellung 352; isolierende und geerdete Aufstellung von Transformatoren 353.

- Ausbrennen von Fehlerstellen** 343.
Auslegen der Kabel 83.
Ausschalter, wasserdichte 301; in Freileitungen 203, 357.
Automaten zur Herstellung sicherer Erdverbindungen 339; zur Unterbrechung fallender Fernleitungen 185.

Backsteine für Kabelschutz 85. 91.
Bahnanlagen, Schutz der Telefonleitungen gegen — 222.
Bahnkreuzungen mit Kabeln 183.
Bahnleitungen, Unfallverhütungsvorschriften 378, 379.
Baumwollspinnereien, Installationen in — 384.
Beanspruchung, zulässige, der Leitungen 136.
Bedienung von Maschinen 352.
Beleuchtung von salpeterhaltigen Räumen 305; elektrische, in staubigen Räumen 396; in Pulverfabriken 305.
Beleuchtungskörper, Zuleitungsdrähte 332; Erdung 363; lichte Weite 364; Leitungen für — 364; Fehler an — 364.
Benzin, Einfluss auf die Feuergefährlichkeit eines Raumes 384.
Bergmannrohr 261.
Bergwerke, Schaltschränke für — 22; Bleikabel für — 308; Wahl der Kabel für — 308; Stahlrohr in Gruben 310; Verlegung der Leitungen auf Isolatoren in — 310; blanke Leitungen in — 310; Befestigung der Isolatorenträger 310; Anschluss der Transformatoren, Apparate 311; Installation in — 321; Spanngrenze 321; Erdschluss 342.
Bergwerksisolatoren in Akkumulatorräumen 246, 300.
Berufsgenossenschaft der Feinmechanik, Unfallverhütungsvorschriften 327, 334, 377.
Beton für Kabelschutzhüllen 91.
Betonrohre für Kabelverlegung, Herstellung der Kanäle 92.
Betriebsanlagen, Massregeln bei Bränden 398.
Betriebsanweisungen für das Personal in durchtränkten Räumen 363; sonstige 334.
Betriebsarbeiten 365; Instruktion für das Personal 365; Isolierung der Werkzeuge 365; isolierende Unterlagen 365; Erdung und Kurzschliessung 366, 367; Einsetzen von Sicherungen 368; während Betriebspausen 368; Überwachung derselben 368; Gerüste bei — 378, 380; an Hochspannungsanlagen, Unfallverhütungsvorschriften 378, 379.
Betriebsleiter, Verantwortlichkeit der — bei Betriebsarbeiten 365; Instruktionen des-
 selben an die Arbeiter 366; Überwachung der Betriebsarbeiten 368.
Betriebsräume, elektrische Leitungsverlegung 299; Zeitraum der Revision 349.
Betriebsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker 366; an Maschinen 365.
Bewegliche Leitungen in Bergwerken 311.
Belegvorrichtung für Isolierrohre 263; für Stahlpanzerrohre 265; für Stahlrohre 286.
Bimetalldraht 195.
Bindedraht 65; für Freileitungen 173.
Bindungen 172; der Leitungen mit Hanfschnur 304; in gefährdeten Räumen 304.
Bitumen als Ausgussmasse für Kabelkanäle 93.
Blanke Leitung als Freileitung 152; als Schleifleitung 253, 361; in Wohnräumen 273, 331, 335; in Bergwerken 310; in Schlagwettergruben 312; in verschiedenen Räumen 330, 331; in Zentralen 356; in Installationen 361.
Blanker Mittelleiter im Elektrizitätswerk Stuttgart 273. Vgl. auch Hdb. VI, 1.
Bleidübel 237, 268.
Bleiglätte und Glyzerin als Befestigungsmittel für Isolatoren 156.
Bleikabel von W. Siemens 80; für Bergwerke 308.
Bleimantel, Erdung 48.
Bleiumhüllte Leitungen 304, 305.
Bleivergiftungen 376; in Akkumulatorräumen 354; Vorschrift des Staatssekretärs zum Schutz der Arbeiter 376.
Bleiwelss, isolierte Leitungen 152.
Blindflansche für Kabelkästen 56.
Blitzpfeil 202, 356.
Blitzschutzvorrichtungen 362; an Schaltanlagen 24; für Freileitungen 202, 332, 335; an Strassenübergängen 185.
Blutlaugensalz 122.
Bogenlampen, Aufhängedrähte 332; Hintereinanderschaltung von — 364; Isolation 160; Kupplung 364; Widerstände, Montage mit Rücksicht auf Feuer-sicherheit 392.
Bolzen für Isolatoren 147.
Bolzendurchschläge in Amerika 147.
Borax zur Imprägnierung des Holzes 122.
Boritiholz für Stangen in den Tropen 130.
Boucherie, Imprägnierung der Hölzer mit Kupfervitriol 115.
Brände in Schnurleitungen 393; in elektrischen Anlagen 396.
Brauereien, Isolationswiderstand 345.
Brenntemperatur verschiedener Körper 385.
Brisanz der Sprengstoffe 388.
Bronze 196.

Sigmaringen, eiserner Verteilungsmast 130;
 Stuttgart, eiserner Verteilungsmast 130;
 Leitungseinführung 298; blanker Mittelleiter 273.
 Elektrizitätswerke, Einführung der Leitungen in — 297, 298.
 Emaillierte Stahlrohre 287.
 Endverschlüsse für Kabel, im allgemeinen 37; für Einfachkabel 40; von Felten & Guilleaume 40, 41; der Siemens-Schuckert Werke 41; der Land- und Seekabelwerke 41; für konzentrische Kabel 41; der Southern Eastern Railway Co. 41, 43; für verselte Kabel von Felten & Guilleaume 42; für verselte Kabel der Land- und Seekabelwerke 42, 43; Montagevorschriften der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 43; Füllmasse 44; Klemmen für — 44; mit Prüfdrahtklemmen 58.
 Englische Rohrinstallationen 288.
 Enteignung beim Bau von Bahnen 176; bei Fernleitung 176.
 Enteignungsrecht in England, Frankreich, Italien, Österreich, Schweiz 178, 179; nach Meili 178.
 Entflammungstemperatur 385.
 Entzündungstemperatur einiger Brennstoffe 385.
 Erdarbeiten, Unfallverhütungsvorschriften 380.
 Erdende Ösen in Fernleitungen 187.
 Erdleitungen, Sicherungen in — 339; Querschnitt 352, 367; an Maschinen 352; mechanischer Schutz 353; Verbindungsstellen in — 353.
 Erdschluss 342; in Akkumulatorenräumen 342, 354; in Bergwerken 342; in Freileitungen 342; in Hausinstallationen 342; in Fabriken 342; in Kabelnetzen 342.
 Erdschlussanzeiger für feuchte Räume 347.
 Erdschlussautomaten 339.
 Erdschlussmeldevorrichtung in Kabelkästen 341.
 Erdströme, Einfluss der — auf die Isolationsmessungen 339.
 Erdung, des Bleimantels 48; der Schutznetze 193; von Ankerdrähten 201; von Eisenrohren, in denen Leitungen für Hochspannung verlegt sind, 271; von Mehrfachleitungen in Warenhäusern 307; an Maschinen mit Aussenlager 353; der Transformatoren 353; von Schalttafeln 354; von Eisenmasten nach Wilkens 358; von Beleuchtungskörpern 363; von Hochspannungsleitungen 366; Erdung und Kurzschliessung bei Arbeiten an Hochspannungsleitungen zur persönlichen Sicherheit 367;

von Hochspannungsleitungen, Warnung vor unsicherer Ausführung 367; von Isolierzangen 369.
 Erdungsvorrichtungen an Schutznetzen 193.
 Essigsäure, Einfluss auf Leitungen 305.
 Eukalyptusholz für Isolatorenstützen 149.
 Explosionsgefahr in Bergwerken 307.
 Explosionsgefährliche Betriebsstätten, Spannungsgrenze 320; was sind — und Lagerräume? 387; Installation 305, 330; Beleuchtung 305; Webers Erläuterungen 387.
 Fabrikationslänge der Kabel 82.
 Fabriken, Erdschluss in — 342.
 Fällungszeit der Holzmaste 113, 118, 120.
 Fangbügel für Freileitungen 345.
 Färbereien, Isolationswiderstand 345.
 Farbmittel für Porzellan 164.
 Fassungsadern 364.
 Fäule der Hölzer 114, 150.
 Fehler, Auftreten von — in Stützen 338; an konzentrischen Kabeln 339; an Beleuchtungskörpern 364.
 Fehlerstellen, chemische Wirkung des Stromes an — 338; Ausbrennen 343.
 Fehlermeldeapparat für Kabelnetze 340.
 Fermentwirkungen 114.
 Fernleitung, erste, in England 78; in Amerika 147; in ländlichem Terrain 177; Widerspruch der Landbesitzer 177; Enteignung 176; Ausserbetriebsetzung 185; erdende Ösen beim Bruche 187; Kurzschliesser 191; am Monongahalafluss 196; Erdung und Kurzschliessung 367; Betriebsarbeiten 398.
 Fernleitungsversuche von Wheatstone & Cooke 78.
 Ferranti, Centrale 273; Leitungen 273.
 Festigkeit des Porzellans 163.
 Feuchte Räume, Installation 300, 320; Spannungsgrenze 320; Isolationswiderstand 345, 347; Erdschlussanzeiger 347; Schalter 347; Instandhaltung derartiger Anlagen 347.
 Feuergefährliche Betriebsstätten, Installation 320; Spannungsgrenze 320.
 Feuergefährliche Räume, Installation 305, 383, 396; Zeitraum für Revisionen 349; Einfluss der Fabrikation 384; Einfluss der Temperatur auf die Leuchtentzündlichkeit der Körper 386; Einfluss des spezifischen Bedarfs an Verbrennungsluft 386; Entflammbarkeit durch verschiedene Lichtquellen 386.
 Feuergefährlichkeit eines Raumes, Kriterium für die — 384.
 Feuersicherheit und Isolationswiderstand 349; alter Anlagen 351; elektrischer Anlagen 383; elektrischer Maschinen 392.

Hartgummirohre 226, 260.
 Hausanschlüsse 290; an unterirdische Netze 290; Kabelkästen für — 290; Abzweigmuffen für — 290; in Köln 291; für Dreileiteranlagen 291; Sicherungen für — 291; an oberirdische Netze 292; der Siemens-Schuckert Werke 293, 295; der Siemens-Schuckert Werke, Wien 293; nach Miller 293; Dacharbeiten 294; Dachständer 294; Kabelabschluss für — 295, Kabelstützen der Süddeutschen Kabelwerke 296.
 Hausinstallationen, Erdschluss 342.
 Hilfeleistung bei Unfällen durch elektrische Schläge 327.
 Hintereinanderschaltung 1; von Bogenlampen 364.
 Hochspannungsanlagen, Abspanndrähte 357; Schaltungsschema und Pläne 366; Unfallverhütungsvorschriften 377, 379.
 Hochspannungsausschalter an Schalttafeln 24.
 Hochspannungsbetriebe, Unfälle 366.
 Hochspannungsisolatoren, geteilte 156; Deltaglocken 155; Ölisolatoren 158, 159, 198.
 Hochspannungskabel, Anordnung im Erdreich 84; Abdeckung 103.
 Hochspannungsleitung 151; in Amerika 147; zulässiger Querschnitt 152; zulässige Verlegungshöhen 193; Abschalten, Kurzschliessen und Erdung 366.
 Hochspannungsmaschinen, Schutz der Klemmen 352.
 Hochspannungsnetze, Arbeiten während Betriebspausen 368; Prüfung von Neuanlagen 368; Übertritt von Hochspannung in Niederspannungsnetze 218; Betriebsarbeiten 368; Verabredung auf Zeit 368.
 Hochspannungsräume, Instruktion für das Personal bei Betriebsarbeiten in 366.
 Hochspannungsschaltanlagen, Voigt & Haeffner 22; persönliche Sicherheit 354.
 Hochspannungsschalttafeln 22.
 Hochspannungsschalter, Anordnung in Schaltanlagen 2.
 Hochspannungsschutzanzug 372; Gebrauchsanweisung 375.
 Hochspannungsvorschriften 329.
 Hochspannungszentralen, 80 000 Volt, Leitungseinführung 299, 356.
 Hölzerne Stützen für Isolatoren 147.
 Holz für Schalttafeln 3; in Hochspannungsanlagen 4.
 Holzarten, Gewicht 120; Saftzeit der — 113.
 Holzdübel 232; Eingipsen 232; Keilbefestigung 232.
 Holzleisten 331; für Schiffsmontage 312; zur Leitungsverlegung 257, 351.

Holzmasse 113; Beschaffenheit 113; Wahl der Holzarten 113; Zubereitung 114; Fäulnis 114; Anstrich 118, 122; Lebensdauer 113, 114, 118, 121, 124; Dämpfen 117, 119; der preussischen Staatsbahnen 119; Untersuchung 122; Schutz durch Faltenpappe 124; Bezeichnung 124; Schutzmittel für nichtimprägnierte — 124; Kernfäule 124; Cementverputz 125; Auswechslung 126; von Zedern 158; Abbrennen 201.

Holzstützen für Isolatoren 161.

Imprägnierung, Arten der — 114, 115; der Hölzer durch natürliche Harzansammlung 114; der Holzmasse mit Kupfervitriol 113, 115; Prüfung der Güte der — bei Boucherie 115; Schutzwert der — 115, 117; Dauer der — bei dem Verfahren nach Boucherie 115; Aufnahmefähigkeit an Flüssigkeit 116, 117, 119, 120; der Masse durch die norwegische Telegraphenverwaltung 116; Prüfung der Güte 115, 117, 118, 122; mit karbolhaltigen Teerölen 117; mit Quecksilber 118; nach Hasselmann 121; im elektrochemischen Bade 122.

Inbetriebsetzung, Prüfung der Anlagen vor der — 348.

Induktion, elektromagnetische in Freileitungen 215; elektrostatische in Freileitungen 215.

Induktionsmethode zur Ermittlung, ob ein Leiter Spannung führt 368.

Installation, Tabelle No. 14, 320, 321; an eine — zu stellende Anforderungen 225; Werkzeuge 227; Entfernung der Befestigungsstellen 245; von Kesselräumen, Tunneln 265; in England 289; von Leitungen in elektrischen Betriebs- und Akkumulatorenräumen 299; von Leitungen in gefährlichen Räumen, von Schuckert 300; in Viehställen 302; in Räumen mit Salpetersäuren 305; in Räumen mit kalkhaltigen Laugen 305; in feuer- und explosionsgefährlichen Betriebsstätten und Lagerräumen 305, 320, 321; in Räumen mit Essigsäure 305; in Dynamitfabriken 305; in Schaufenstern, Warenhäusern 306; in Maschinenhäusern, Bergwerken 307, 321; von Leitungen in Strecken 309; in feuchten Räumen 320; in trockenen Räumen 320; in chemischen Betriebsstätten und Lagerräumen 320; in Räumen mit ätzenden Dünsten 321; in durchtränkten Räumen 321; in Theatern 321; blanke Leitungen 361; Schutz der Leitungen in — 361; Massnahmen zur Erhöhung der Feuersicherheit 392;

- Kabelgarnituren, Konstruktion 37; Füllmasse 44.
- Kabelgraben 86.
- Kabelkanäle, Anforderungen 90; Explosionen 93; aus Gusseisen 94; aus Steingut 95; zum Ausrichten 97; der Reichspost 100; Kosten 103.
- Kabelkästen, Konstruktion 54, 85; geteilte 54; Ölfüllung 54; Fundamente 54; Sammelschienen 54; Schachtrahmen für — 54; für Dreileiteranlagen mit geerdetem Mittelleiter 54; Kabeleinführung in — 54; der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 54; Kabelstützen an — 55, 57; Kabelendverschlüsse 55, 58; Blindflansche an — 56; der Süddeutschen Kabelwerke 63; umschaltbare Sicherungen in — 63; für Drehstrom 63; von Felten & Guilleaume 63, 64; abschaltbare, von H. J. Moos 64; bei Hausanschlüssen 290; mit Erdschlussmeldevorrichtung 341; Erdschluss 342.
- Kabelkran 82, 83.
- Kabelmasse 54.
- Kabelmontage in Bergwerken 309; an Bord, Befestigung 313.
- Kabelmuffen, Demontage 367. Siehe Muffen.
- Kabelnetze, konzentrische, Spannungssicherungen 339; Isolationswiderstand 339; Erdschluss 342; Betriebsarbeiten 367.
- Kabelrinne für Flusskabel 105.
- Kabelrollen 88.
- Kabelschächte 98.
- Kabelschellen, für Grubenkabel 111; bei Schiffsmontagen 313.
- Kabelschuhe 38, 209; für Kabel mit Prüfdraht 38; für Installationsleitungen 71; angeschweisste, von Felten & Guilleaume 71; von Siemens & Halske 71; von Schuckert 71.
- Kabelschutz, Wahl des Materials 91; aus Cement 91; aus Beton 91; durch gemauerte Kanäle 92; aus Holz 94; aus Stampfbeton 100; durch Drahtnetze 102; durch Cementbetonsäcke 103; gegen Atmosphären 184; gegen chemische Einflüsse 304; an Bord 314.
- Kabelstützen an Kabelkästen 55, 57; für Hausanschlüsse der Süddeutschen Kabelwerke 296.
- Kabeltrace, Wahl derselben 86.
- Kabeltransport 82; Wagen für — 82, 83.
- Kabeltrommeln 83.
- Kabelverbindungen in Grubenkabeln 111.
- Kabelverlegung, Allgemeines 77, 80; Wahl der Verlegungsart 80; in Rohren 85; in Systemen aus Steingut 85; in Gräben 85; in Kanälen 85; in Berlin 85; Umgehung von Hindernissen 86; an Strassen- und Geleisekreuzungen 86; Personalanordnung 88; Kennzeichnung der Kabel durch Bleistreifen 88; Ausrichten 88; in Eisenkästen 94; in Liverpool 94; in Thonrohren 96; in den Vereinigten Staaten 96; in Betonröhren 100; Beispiele verschiedener Städte 103; in Strecken 309; an Bord 313, 316.
- Kabelverpackung 82.
- Kainit 122.
- Kalciumverbindungen zur Imprägnierung der Hölzer 121.
- Kanäle für Kabel aus Holz 94; gemauerte für Kabel 97; aus Gips zur Leitungsverlegung 592; Rohrkanäle siehe Rohre.
- Kaolin 160, 162, 164.
- Karbolineum 124.
- Karbolsäure 117.
- Karbolsäurehaltige Teeröle zur Imprägnierung der Hölzer 117.
- Kastanienholz 113.
- Kautschuk als Isoliermasse für Leitungen 77.
- Keilverschraubung von Eiffe & Fehr 237.
- Kernfäule 124.
- Kiefernholz 113, 117, 120, 132.
- Kieselerde 161.
- Klemmen 250; für Endverschlüsse 44; Distanzklemmen 28.
- Klemmrollen nach Peschel 250.
- Klemmvorrichtungen für Kabel und Muffen 45.
- Kobalt als Färbemittel für Porzellan 164.
- Kohlen, Einsetzen von — 364.
- Kolophonium als Lötmittel 65.
- Kombinationsmuffen 266.
- Kontakte, mangelhafte, an Schalttafeln 3; bei Stahlschlitzrohr 273, 275.
- Kontaktinstrumente zur Unterbrechung fallender Fernleitungen 185.
- Kontaktleitungen 361.
- Kontaktvorrichtungen in Schlagwettergruben 312.
- Konzentrische Kabel, Endverschlüsse 41; Abzweigmuffen 50; Fehler an — 339.
- Konzentrische Leiter für Anlagen mit geerdetem Mittelleiter 289.
- Kosten der Kabelkanäle 103; für Kabelverlegung 111; für Kabelverbindungen 112; der Pflasterarbeiten bei Kabelverlegung 112; der Herstellung von Kabelgräben 117; der Schutzschäfte 126; der Fernleitung mit Schutznetzen und Gould'scher Kupplung 190.
- Kraftübertragung Wangen i. Allgäu 33; Maurice—Lausanne 156; Guanaguato Mexiko 157; von Lauffen nach Frankfurt 159; Tivoli—Rom 179; Paderno—Malland 179; nach Bondry 183; La goule 185; am Monongaheloffluss 196; an der Meerenge von Carquiner 197; St. Maurice—Lausanne, Isolationsmessung 349.

- triebssicherheit 299; an Bord 312, 313;
 auf Schiffen, Beginn der Montage 312;
 Vorsichtsbedingungen der Feuerver-
 sicherungsgesellschaften 331. Siehe In-
 stallationen.
- Leitungszug 133, 138.
 Lichtbogen, Unterdrückung durch Press-
 luft 350.
 Lieferungsvorschriften für Isolatoren der
 Kaiserlich deutschen Reichstelegraphen-
 verwaltung 170.
 Lochstanzen für Schaltafelarbeiten 30.
 Lösbare Kontakte, Sicherungen 333.
 Lötmitte für Leitungen 37; für Drähte 65.
 Lötstellen in Sellen 66; in Freileitungen
 67; in Schnurleitungen 74.
 Lötungen an Leitungen 37; in Schleif-
 leitungen 254.
 Lötzinn 65.
 Luft als Isolator 337.
 Luftleitung, Spannungsgrenze 337.
- Mahlmühlen, sind — explosionsgefährliche
 Räume? 389.
 Mangan als Färbemasse für Porzellan 164.
 Mannesmannrohre für die Tropen 130;
 Rohrmaste 126, 129.
 Maria Theresienstadt 212.
 Marmor, für Schalttafeln 4; leitende Adern
 in — 342.
 Maschinen, Erdung 352; isolierende oder
 geerdete Aufstellung 352; mit Aussen-
 lager, Erdung 353.
 Maschinenkabel zur Bergwerksisolation 357.
 Massnahmen an Transformatoren zur Er-
 zielung persönlicher Sicherheit 353;
 zur Erzielung persönlicher Sicherheit an
 elektrischen Maschinen 252; desgl. an
 Schalttafeln 354; desgl. in Centralen 356.
 Massregeln bei Bränden von Dr. May 397,
 398.
 Maste, aus Eisen 126, 194; in den Tropen
 130, 196; Belastung 132; Befestigung
 der Stützen und Traversen 141; für
 Hochspannung 154; Zopfstärken 194;
 für Überführungen 196, 197; Numme-
 rierung 201; Zeichen für die Imprä-
 gnierung 201; Einsetzen der — 202;
 hölzerne 357; Warnungstafeln an —
 357; Schutzmassregeln an eisernen —
 357; desgl. an hölzernen — 360; Schutz-
 verkleidung 359; hölzerne — Über-
 gangsspannung zwischen Mast und
 Erde 361.
 Mastabstände 194; in Kurven 138.
 Mastverankerung 200.
 Mastverlängerungen 194.
 Mastverstärkungen 199.
 Maurerarbeiten bei Installationen 220.
 Maximalausschalter an Schalttafeln 24.
 Mehrfachleitungen, Schalter in — 74; in
 Warenhäusern 307; in verschiedenen
 Räumen 320, 321.
 Mehrfachschnurleitungen in explosions-
 gefährlichen Räumen 331, 335.
 Mennige, isolierte Leitung 152.
 Messinstrumente an Schalttafeln 4, 5; bei
 Niederspannung 5; bei Hochspannung 5.
 Metalleement 151.
 Metalloxyde, Lösung zur Imprägnierung
 der Hölzer 121.
 Metallumklöppelte Leitungen in Bergwerken
 311.
 Mittelleiter, blanker, im Elektrizitätswerk
 Stuttgart 273; Erdung 332.
 Mittelspannungsvorschriften 329.
 Montage von Kabelstützen 57; von End-
 verschlüssen an Kabelkästen 58; von
 Drahtverbindungen 65; von Schiffen,
 Werkzeuge 230; von Kupferschienen,
 Werkzeuge 230; Muffen 52.
 Montagevorschriften für Herstellung von
 Endverschlüssen 43; Füllmasse 44; für
 Muffen 45; für die Herstellung von
 Gipskanälen für die Leitungsverlegung
 259; für Verlegung von Papierrohr
 ohne besonderen Schutz 261; für Papier-
 rohr mit Messingmantel 263; für Stahl-
 panzerrohr 265; von Bergmann für
 Isolierrohre 266; für die Verbindung
 bleiumhüllter Leitungen 304; für
 Schiffsmontage 313.
 Montagewerkzeuge 230.
 Muffen, siehe auch Verbindungsmuffen,
 Abzweigmuffen, Kreuzungsmuffen; für
 Rohrverlegung siehe Kombinations-
 muffen, Reduktionmuffen; Allgemeines
 44; Montagevorschriften 45; der All-
 gemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 45;
 Vermeiden von Rosten bei — 48; Be-
 zeichnung für — 54; abschaltbare —
 von Edmunds 64; von Schuckert 64;
 von J. Schmidt 64; für Stahlschlit-
 zrohr 275, 276; Erdschluss an — 342.
 Muffenverbindungen 71.
- Nachtsignalapparate 316.
 Nadelhölzer als Maste 117.
 Naphtalin 117.
 Natriumkarbonat zur Imprägnierung der
 Hölzer 122.
 Niederspannungskabel, Anordnung im Erd-
 reich 84.
 Niederspannungsleitungen, zulässiger Quer-
 schnitt 152.
 Niederspannungsnetze, Übertritt von Hoch-
 spannung in —, Betriebsarbeiten 218; 368.
 Niederspannungsvorschriften 329.
 Nietverbinder von Hofmann 68.
 Normalien des Verbandes deutscher Elektro-
 techniker, Einfluss auf die Feuersicher-
 heit 393.

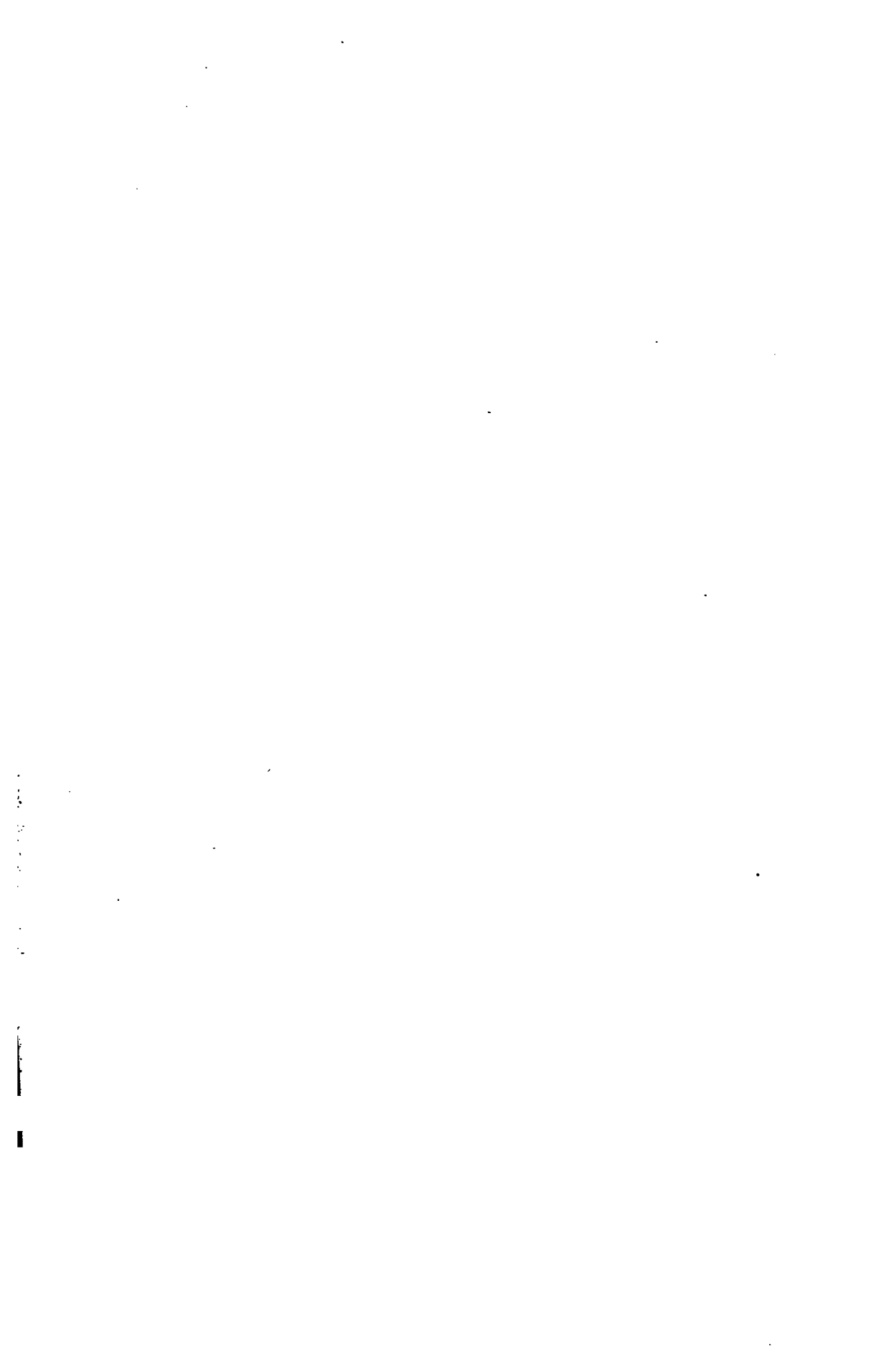
- Rohrmaste 126.
 Rohrmontage, Werkzeuge zum Einziehen der Leitungen 267.
 Rohrsystem Simplex Co. 286.
 Rohrverlegung 226; Grundsätze für — 258; Anzahl der Leitungen in einem Rohr 258; Auswechselbarkeit der Leitungen 258; für Gleichstromleitungen 258; für Wechselstromleitungen 258, 259; Gipskanäle in Österreich 259; Abzweigdosen für Hartgummirohre 260; Hartgummirohre 260; Papierrohre 260 ff.; Isolierrohre ohne besonderen Schutz 261; Isolierrohre mit Messingmantel 261; Werkzeuge 263; Verbindungsmuffen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft 264; Isolierrohre mit Mantel aus Blei 264; Stahlpanzerrohre 264; Biegevorrichtungen 265; unter Putz 267; Abzweigscheiben 268; bei salpeterhaltigen Wänden 268; Gasrohre 270, 272; Erdung von Eisenrohren 271; Stahlrohre, emaillierte 272; Stahlschlitzrohre, Sicherheit der Kontakte 272; in Theatern 286; Safety, Concentric Wiring Co. 289; in Gruben 310; in verschiedenen Räumen 320, 321.
 Rollen 232; in Akkumulatorenräumen 300; auf Flascheisen 233; von Schanzenbach 239; für Spannungen bis 500 Volt 244; über 500 Volt 245; Festbinden der Leitungen auf den — 246; für die Verlegung von Zellschalterleitungen 248; amerikanische — 249; in verschiedenen Räumen 320, 321.
 Rollenträger zur Befestigung an Trägern 234; von Kötting & Co. 235.
 Rostschutz von Dübeln 233; für Kabelarmaturen 297.
 Rückwirkende Kraft der Vorschriften 334.
 Sägewerke 384.
 Saftzeit der Hölzer 113, 118.
 Salpetersäure, Wirkung der — auf die Holzfasern 116; Einfluss auf Leitungen 305.
 Sammelfringe für Verteilungspunkte an Freileitungen 208, 209, 212.
 Sammelschienen 28; für Kabelkästen 54, 63.
 Schachtrahmen für Kabelkästen 54.
 Schaltanlagen, Allgemeines 1; Zweck der — 1; Bezeichnung der Apparate 1; Leitungsführung an — 1; Anordnung der Apparate 2, 4; Schaltungsschema für — 2; Einteilung 7; von Örlikon 15, 22; der Centrale der Baseler Strassenbahn 15; der Sächsischen Maschinenfabrik Chemnitz 19; Übertragung der Bewegung auf Schalter 21; Leitungsmaterial 22; Leitungsverlegung an — 22; im Elektrizitätswerk der Stadt Bern 22; für Hochspannung, mehrere Räume 22; Leitungsverbindungen 24; Beschaffenheit der Fussböden 355.
 Schalter, im Maschinenstromkreis 1; in Schaltanlagen 2; in Mehrfachleitungen 74; Bezeichnung der — 331; Moment-schalter 331; in nach feuchten Räumen führenden Leitungen 347; unter Berücksichtigung persönlicher Sicherheit 355.
 Schalteranschlüsse bei Stahlschlitzrohr 286.
 Schalterleitungen, Abzweigklemmen 74.
 Schalterkästen an Bord 317.
 Schalthäuschen 19.
 Schaltkästen mit Verriegelung von Schuckert 369.
 Schalttafel 10, 15, 19.
 Schaltsäulen 10, 15; von Örlikon, von Voigt & Haefner 19; in Freileitungsnetzen 19.
 Schaltschränke 10, 15, 21; in Bergwerken 22; von Siemens & Halske 22.
 Schalttafel, Anschlüsse 3; Brände 3, 24; Felder 5, 12; Platten, Material 3, 10; Isolierung 12; Leitungen, Verwendung von Staniol 24; Anstrich von — Leitungen 30; Bau, Werkzeuge 30.
 Schalttafeln, aus Holz 3; Abstände vom Gebäude 3; freistehende — 3, 10, 14; für Gleich- und Wechselstrom 5; Anordnung von Widerständen an — 5, 14; kleine — 10; normale — der Siemens-Schuckert Werke 10; in Dreileiteranlagen 12; Leitungskreuzung 24; Zugänglichkeit der Rückseite an — 24; Maximalausschalter 24; Blitzableiter 24; Hochspannungsausschalter 24; Verlegung von Kupferschienen 28; Oberflächenleitungen 342; Erdung, Isolierung 354; Massnahmen zur Erzielung persönlicher Sicherheit 354; Bedienungsgang 355.
 Schaltungsschema für Schaltanlagen 2, 33; für Hochspannungsanlagen 366.
 Schaltungszeichnungen 31.
 Schaufenster, Installation 306, 384; Polizeivorschrift 306; Feuersicherheit elektrischer Anlagen in — 390; Beleuchtung 391.
 Schaukästen, Polizeivorschrift 306.
 Schellack als Isoliermittel für Leitungen 77.
 Schellen in verschiedenen Räumen 320, 321.
 Schiefer für Schalttafeln 4; leitende Adern in — 342.
 Schienen-Biegemaschinen 30.
 Schienen-Isolatoren 30.
 Schienen-Klammern 28.
 Schiffskörper als Leitung 312.
 Schiffsmontage, Werkzeuge 230; Holzleisten 312; an Schiffskörpern 312; Leitungsverlegung 312; Leitungsmaterialien

Wickelmaschine von Heyde für Leitungsbünde 69.
Widerstände, Anordnung an Schalttafeln 5, 14.
Widerstand des menschlichen Körpers 323, 324.
Widerstandsmessungen beim Menschen 324.
Wiederbelebungsversuche bei Unfällen durch elektrische Schläge 382, 383.
Windbelastung 133; von Schutznetzen 180.
Winddruck 133.
Windgeschwindigkeit 133.

Winkelklemmen 71.
Wohnräume, Spannungsgrenze 362; blanke Leitungen in — 273; Zeitraum der Revisionen 349.
Würgestellen an Drähten 64.
Zedernholz für Stangen 158.
Zellenschalterleitungen 28, 30.
Ziehbänder 144.
Zinkchlorid zur Imprägnierung der Maste 116, 119.

Verbindungsmuffen 48; Kabelkästen 63; Kabelschuhe 71.
 Fischer, R. v., Maste in den Tropen 130.
 Franz, P. Jos., Fortpflanzung der Elektrizität 77.
 Freitag, siehe Wayss 100.
 Ginovi, Riccardo, Isolatoren 350.
 Gould'sche Kupplung 188.
 Gray, Stephan, Fortpflanzung der Elektrizität 77.
 Greizer Eisenwerk, Maste etc. 183.
 Grison, Paris, Gummihandschuhe 370.
 Grittner, Budapest, Holzimprägnierung 116.
 Harburger Gummikamm-Co., Abspannisolatoren 201; Spanndraht-Wirbelsolatoren 357.
 Hartmann & Braun, A.-G., Abzweigklemmen 74; Werkzeuge 231; Schalterdübel 234; Drahtdübel 237; Stahldübel 237; Hochspannungsrollen 246; Reformrollen 252; Bergwerksisolatoren 252; Stahlschlitzrohr 278; Instrumente zu Isolationsmessungen 350.
 Hasselmann, Imprägnierung der Hölzer mit Lauge aus Eisenvitriol etc. 115, 121.
 Heinicke, Anspritzen der Leitung durch die Feuerwehr 399.
 Heise & Thiem, Schlagwetterversuche 392.
 Herningray Glass Comp., Isolatoren 156.
 Herzog & Feldmann 132, 136, 137; Isolatoren 162; Entflammbarkeit der Schnurleitungen 394.
 Hevendahl, J., Kabelsteine 98.
 Heyde, Wickelmaschine für Leitungsbünde 69.
 Hill & Co., Gummihandschuhe 370.
 Hofmann, Nietverbinder 68.
 Hotopp, Berlin, Kabelsteine 99.
 Howard, Kabelverlegung in Eisenkästen 94; Solidssystem 96.
 Hultmann, Stockholm 101, 102.
 Internationale Elektrizitäts-Gesellschaft, Spannungssicherungen in konzentrischen Kabelnetzen 339; Fehlermeldeapparat 340.
 Johnson & Philipps, Öisolatoren 158.
 Jonet, Bericht über Versuche mit Gummihandschuhen 371.
 Kallmann, Querschnitt einer Strasse 86.
 Köttgen & Co., Rollenträger 235; Bleidübel 237.
 Kothe & Co., Köln, Cementstein 100.
 Kratter, Versuche an Tieren 326.
 Kyan, Imprägnierung der Hölzer mit Doppelchlor-Quecksilber 115.

Lahmeyer & Co., Schienenisolatoren 30.
 Land- und Seekabelwerke, Köln, eiserner Endverschluss 41; Verbindungen 48; Abzweigmuffen 50; Kreuzungsmuffen 51; Verfahren zum Verlegen der Kabel 89; Verlegung von Flusskabeln 105, 106, 107.
 Langen, siehe Schmidt.
 Lauchhammer A.-G., Maste 130.
 Laux, Karl, Gummihandschuhe 370.
 Lavauchy in Vivis, Kabelsteine 102.
 Lenoir & Prudhomme, Öisolatoren 158.
 Lesage, unterirdische Verlegung der Leitungen in Thonröhren 77.
 Locke, Isolatoren 157.
 May, Massregeln bei Bränden 397.
 Meili, Enteignungsrecht 178.
 Miller, Hausanschlüsse 293; Anordnung der Verbindungsstellen 299.
 Missouri River Comp., Freileitungen 156, 158.
 Moos, H. J., abschaltbare Kabelkästen 64.
 Morse, Samuel, Fieborg Breese, ober- und unterirdische Leitungen 78.
 Nollet Abbé, Fortpflanzung der Elektrizität 77.
 Norwegen, Vorschriften über die Anbringung geerdeter Ringe an Holzmasten 361.
 Örlikon, Maschinenfabrik, Schaltsäulen 15; Schaltanlagen 22, 33, 183, 185.
 Oetzel, optische Telegraphie 79.
 O'Shanghnessy, Unterwasserleitungen 78.
 Peschel, Stahldübel 237; Hochspannungsrollen 246; Klemmrollen 250; Rohrsystem 270; Stahlschlitzrohr 274.
 Philipps, siehe Johnson 158.
 Porzellanfabrik Hermsdorf-Klosterlaussnitz 154; Prüfstation 168.
 Prudhomme, siehe Lenoir 158.
 Rentsch, Isolierdübel 239; Hochspannungsrollen 246.
 Rheinische Dynamitfabrik, Filiale Leimbach, Installation 305.
 Richter, Dr., Weil & Co., Abzweigklemmen 75.
 Riedel, Krallendübel 237.
 Rütgers, Imprägnierung der Maste mit Zinkchlorid und karbolsäurehaltigen Teerölen 115, 119, 120.
 Safety, Concentric Wiring Co., London, Rohrverlegung 289.
 Schanzenbach, Isolierdübel, Isolierrollen 239.
 Schellbach, Kabelkanal 101.
 Schilling, Telegraphenleitungen 78.
 Schmidt, J., abschaltbare Muffen 64.
 Schmidt & Langen, Cementrohre 102.



356832

Dritte Abteilung.

Berechnung von Leitungsnetzen

bearbeitet

von

B. Soschinski.

Mit 159 Abbildungen.

Vorwort.

Der vorliegende Band des Handbuches behandelt die Berechnung von Leitungsnetzen, die die Verteilung von in centralen Punkten erzeugter Energie auf ein grösseres Verbrauchsgebiet vermitteln. Doch sind hier nur diejenigen Netze berücksichtigt, die der Übertragung von Energie für Licht und mechanischen Antrieb in festen Verbrauchsstellen dienen; es sind also alle der Fortbewegung dienenden Verwendungsgebiete, d. h. Bahnanlagen, ausgeschlossen worden, da diese im Zusammenhang an anderer Stelle behandelt werden sollen.

Das mir vorschwebende Ziel für die Behandlung des Stoffes war, alle Methoden folgerichtig und übersichtlich unter möglichster Berücksichtigung und Anführung der einschlägigen Literatur zu entwickeln, die eine Berechnung von zusammenhängenden bisymmetrischen Netzen, wie sie allein zur Energieübertragung praktisch in Frage kommen, wirklich ermöglichen. Dagegen verbot es der mir zur Verfügung stehende Raum von selbst, auch die angrenzenden Gebiete zu berücksichtigen, so z. B. die Regelungsverfahren und die Verfahren zur Bestimmung von Netzfehlern.

Aus dieser Begrenzung meiner Aufgabe erklärt es sich, dass ich einerseits die für die Berechnung allgemeiner Netze (Wheatstonesche Brücke und dergl.) wertvolle Maxwellsche Maschenmethode, andererseits die graphischen Berechnungsmethoden nicht in den Kreis meiner Betrachtungen gezogen habe. Die erstere lässt sich auf bisymmetrische Netze nicht anwenden, weil sich die ihr zu Grunde liegende Forderung, das gesamte Netz, also positive und negative Netzhälfte samt Energieerzeugern und Verbrauchsgeschäften in einer Ebene auszubreiten, ohne dass sich die einzelnen Leiter schneiden, nicht allgemein verwirklichen lässt; die letzteren können überhaupt nicht als Berechnungsverfahren für zusammenhängende Netze an-

gesprochen werden. Zur Erläuterung des Verhaltens einfacher unter Spannung stehender Leiter wurde die graphische Darstellung dagegen vielfach, besonders bei Wechselstromerscheinungen, herangezogen, da sie hier wertvolle Dienste leistet.

Dass die Darstellungen des eigentlich Neuen nur wenig bringen konnten, ist bei der Abgeschlossenheit und hohen Vollendung der Berechnungstheorien nicht verwunderlich. Neu ist nur der Abschnitt über den Ausgleich in zusammenhängenden Netzen.

Berlin, im November 1905.

B. Soschinski.

Inhaltsverzeichnis.

Geschichtlicher Überblick	Seite 1
-------------------------------------	------------

Die Berechnung offener Leitungen.

Die offene Leitung mit nur einer Belastung.

1. Nutzwiderstand und Leitungswiderstand	3
2. Offene und geschlossene Leitungen	3
3. Berechnung der offenen Leitung mit nur einer Belastung	3
4. Die Kontrolle der Leiter auf Feuersicherheit	5
Beispiele	6

Die Elastizität einer Anlage.

5. Schwankungen der Nutzspannung	7
6. Definition der Elastizität	8

Offene Leitungen mit verteilter Belastung.

7. Schaltungsarten	8
------------------------------	---

Die Reihenschaltung.

8. Verbindung der Nutzwiderstände bei Reihenschaltung	8
9. Berechnung der Leiter bei Reihenschaltung	9
Beispiel	9
10. Die Elastizität der Leitung bei Reihenschaltung	10
11. Berechnung der Leitung auf Elastizität bei Reihenschaltung	10
12. Wirkungsgrad der Leitungen	11

Die Wirtschaftlichkeit der Leitungsanlage.

13. Die Thomsonsche Regel und ihre Entwicklung	12
14. Begrenzung der Aufgabe	13
15. Die Kosten der Leitung	13
16. Kosten der Energieverluste	14
17. Die wirtschaftlichen Grössen	15
18. Fortsetzung	16
19. Fortsetzung	17
20. Fortsetzung	17
21. Berücksichtigung der Kosten anderer Teile der Anlage	17
22. Erweiterung der Ergebnisse auf Wechselstrom	18
23. Werte der Konstanten	19

	Seite
24. Werte von a und b	19
25. Werte von C	21
26. Werte von α	21
27. Werte von β	22
28. Werte von T , τ und \mathfrak{T}	22
29. Werte von p_i und p_0	26
30. Grenzwerte von z_L , z_n und j_w	28
Beispiel	28
31. Graphische Ermittlung der wirtschaftlichen Grössen	29

Die Parallelschaltung.

32. Reine Parallelschaltung von Widerständen	31
33. Gemischte Schaltung	32
34. Die Elastizität bei Parallelschaltung und der maximale Spannungsverlust	33
35. Berechnung der Stromverteilung	34
36. Bezeichnungen	35
37. Spannungsverteilung	35
38. Querschnittsberechnung auf Grund des geringsten Kupfergewichtes	38
Beispiel	42
39. Querschnittsberechnung bei konstantem Querschnitt	43
Beispiel	43
40. Querschnittsberechnung bei konstanter Stromdichte	44
Beispiel	46
41. Besondere Fälle der Stromverteilung	46
42. Querschnittsberechnung bei verzweigten Leitungen	49
43. Geringstes Kupfergewicht bei verzweigten Leitungen	49
44. Konstanter Querschnitt bei verzweigten Leitungen	52
45. Konstante Stromdichte bei verzweigten Leitungen	53
Beispiel	54
1. Geringstes Kupfervolumen	54
2. Konstanter Querschnitt	56
3. Berücksichtigung des Hauptstranges allein; konstante Stromdichte	57
4. Berücksichtigung des Hauptstranges allein; konstanter Querschnitt	58

Wechselstrom-Stromkreise.

46. Bezeichnungen und Definitionen	59
47. Die Leitungskonstanten und ihre Beziehungen zu einander	61
48. Die Bestimmung der Leitungskonstanten des Wechselstromkreises. Widerstand	63
49. Induktivität	65
50. Induktive Reaktanz	65
51. Kapazität	66
52. Ableitung	67
53. Kapazitäts-Suszeptanz	70
54. Wirksame Reaktanz und Suszeptanz	71
55. Messung der Leitungskonstanten	74
56. Strom- und Spannungsverteilung bei Wechselstrom	78
57. Fortsetzung. Leiter ohne Reaktanz	78
58. Querschnittsberechnung bei Leitern ohne Reaktanz	82
Beispiel	82
59. Strom- und Spannungsverteilung bei Leitern mit Reaktanz	83
60. Querschnittsberechnung langer Leitungen	86
Beispiel	87

Die geschlossenen Zweileiter-Leitungsnetze.

61. Definitionen	90
62. Bezeichnungen	91

Strom- und Spannungsverteilung in geschlossenen Netzen.

	Seite
63. Der einfache geschlossene Leitungsstrang	92
64. Besondere Fälle der Stromverteilung	95
65. Überlagerung der Ströme im geschlossenen Leitungsstrang	95
66. Querschnittsberechnung des geschlossenen Leitungsstranges	96
67. Graphische Darstellung der Strom- und Spannungsverteilung	96
68. Der unvollkommen geschlossene Leitungsstrang	98
69. Äquipotentielle Verlegung der Belastungen	101
Beispiel	103
70. Verlegung der Belastungen und Überlagerung zweier Stromverteilungen	104
Beispiel	105
71. Das allgemeine Netz mit Knotenpunkten	107

Gleichungsmethoden.

72. Netz mit einem Knotenpunkt	107
73. Spannungsmethode. (Coltri-Teichmüller)	108
74. Strommethode. (Schnittmethode von Herzog-Stark)	108
75. Netze mit mehreren Knotenpunkten	109
76. Spannungsmethode	109
77. Strommethode	111

Die praktische Auflösung der Gleichungen.

78. Allgemeines über die einschlägigen Verfahren	113
79. Wahl des Gleichungssystems	115
80. Gaussches Näherungsverfahren	116
Beispiel	118
81. Näherungsverfahren von Mehrke	121
82. Gaussches Verfahren. Fortsetzung	121
Beispiel	122
83. Verfahren von Verhoeckx	123
84. Fortsetzung. Ableitung der Lösung für n Knotenpunkte aus der für $n - 1$ Knotenpunkte	126
85. Fortsetzung. Gang der Rechnung	129
86. Netzkontrolle	130
Beispiel	130
87. Vergleich zwischen dem Gausschen und Verhoeckxschen Verfahren	133

Netzberechnung durch schrittweise Vereinfachung des Netzes.

88. Methode der widerstandstreuen Netzbildung von Frick-Kenelly	136
89. Zweieck-Umbildung. (Frick)	136
90. Zweieck-Umbildung bei mehreren Knotenpunkten	137
Beispiel	141
91. Widerstandstreue Umbildung des Dreiecks in einen Stern und umgekehrt. (Kenelly)	143
92. Übertragung der Ströme	146
Beispiel	148
93. Vergleich der Frick-Kenellyschen mit der Spannungsmethode	158

Die Vereinfachung grosser Netze.

94. Netzteilung	158
---------------------------	-----

Die Netzberechnung auf Ausgleich.

95. Wesen der Ausgleichsrechnung	160
96. Ausgleich zwischen zwei belasteten Speisepunkten	161
97. Ausgleich bei mit nur einer Stromentnahme belasteten Verteilungsleitungen	167
98. Ausgleich bei gleichmässig verteilter Belastung	173
99. Ausgleich bei mehreren von der Verteilungsleitung abgezweigten Belastungen	173
100. Einfluss von Sammelleitungen auf den Ausgleich	174
101. Der Ausgleich in verzweigten Netzen	175

	Seite
102. Änderung nur einer Knotenpunktsbelastung	177
103. Änderung mehrerer Knotenpunktsbelastungen	181
104. Änderung einer Belastung zwischen zwei Knotenpunkten	182
105. Änderung beliebiger Belastungen	184
106. Grösse der Werte ϵ_{NM} , a_{NM} und u	185
Beispiel	186

Wechselstromnetze.

107. Bestandteile des Wechselstromnetzes	192
108. Das Sekundärnetz	193
109. Das Primärnetz	194

Die Querschnittsberechnung in geschlossenen Leitungsnetzen.

110. Die Grundlagen für die Projektierung von Netzen	195
111. Die Querschnittsberechnung geschlossener Netze. Gleichungsmethode	195
112. Querschnittsberechnung geschlossener Netze auf Grund des günstigsten Speisungsbereiches. (Müllendorff)	197
113. Die günstigste Lage der Speisepunkte	199
Beispiel	200
114. Die günstigste Zahl der Speisepunkte. (Sengel)	201
115. Fortsetzung. Bezeichnungen	203
116. Fortsetzung. Die Netzkosten	203
117. Fortsetzung. Quadratische Netzelemente	205
118. Fortsetzung. Andere Netzformen	209
119. Fortsetzung. Die günstigste Zahl der Speisepunkte bei Netzen ohne Transformatoren	210
120. Fortsetzung. Netze mit Transformatoren	211
121. Fortsetzung. Bemerkung zur Anwendung der Formeln	213
Beispiel	213
122. Die Speiseleitungen	217
123. Sammelleitungen	218
124. Teilung der Speiseleiter	218
125. Die günstigste Lage der Centrale	219
126. Einige Erfahrungszahlen aus der Statistik bestehender Werke	219
127. Erweiterung der Netze	222

Die Mehrleitersysteme.

128. Anwendungsgebiet der Mehrleitersysteme	224
---	-----

Das Dreileitersystem.

129. Entstehung des Dreileitersystems und Bezeichnungen	224
130. Stromverteilung im Dreileitersystem	225
131. Spannungsverteilung im Dreileitersystem	226
132. Einfluss des Mittelleiterquerschnitts	227
133. Zulässiger Spannungsverlust beim Dreileitersystem	228
134. Wahl des Mittelleiterquerschnitts	229
135. Sicherung des Mittelleiters	231
136. Erdung des Mittelleiters	231

Das Fünfleitersystem.

137. Erweiterung der Ergebnisse auf das Fünfleitersystem	232
--	-----

Die Mehrphasensysteme.

138. Die Mehrleitersysteme bei Wechselstrom	233
139. Drehstromsystem	234
140. Die Elastizität und der zulässige Spannungsabfall in Drehstromnetzen. Dreieckschaltung der Stromempfänger	235

141. Fortsetzung. Sternschaltung	238
142. Wahl des Spannungsabfalls und des Nullleiterquerschnitts bei Sternschaltung	240
143. Zweiphasennetze	241

Vergleich der Metallmengen der verschiedenen Leitungssysteme.

144. Grundlagen des Vergleichs	244
145. Vergleichung von Niederspannungsnetzen auf Grund gleicher Elastizität und Lampenspannung	244
1. Zweileitersystem	245
2. Dreileitersystem	245
3. Fünfleitersystem	245
4. Drehstrom mit Dreieckschaltung	246
5. Drehstrom mit Sternschaltung	246
6. Zweiphasenstrom, unverkettet	246
7. Zweiphasenstrom, verkettet	246
146. Gleiche Elastizität, verschiedene Lampenspannung	246
147. Gleiche Linienspannung und gleicher prozentualer Energieverlust. Hochspannungsleitungen	247
1. Zweileiter-Gleichstrom	247
2. Zweileiter-Wechselstrom	247
3. Drehstrom mit Dreieckschaltung	247
4. Drehstrom mit Sternschaltung	247
5. Zweiphasenstrom, verkettet	247

Vergleich der mit den verschiedenen Systemen erreichbaren Speisegebiete.

148. Mittlere Radien der Speisegebiete	248
--	-----

Messung der mittleren Netzspannung.

149. Die Prüfdrähte	249
Beispiel	251
Sachregister	252
Namenregister	255

Nachweis der Hauptgleichungen.

Gleichung	I	Seite	5	Gleichung	XXIII	Seite	95
"	II	"	36	"	XXIV	"	95
"	IIa	"	36	"	XXV	"	103
"	III	"	36	"	XXVI	"	109
"	IIIa	"	36	"	XXVII	"	110
"	IV	"	40	"	XXVIII	"	166
"	V	"	40	"	XXVIII a	"	166
"	VI	"	43	"	XXVIII c	"	178
"	VII	"	43	"	XXVIII d	"	182
"	VIII	"	43	"	XXIX	"	166
"	IX	"	45	"	XXIX a	"	172
"	X	"	45	"	XXIX b	"	173
"	XI	"	47	"	XXIX c	"	179
"	XIa	"	48	"	XXIX d	"	182
"	XII	"	47	"	XXX	"	167
"	XIII	"	81	"	XXXI	"	167
"	XIIIa	"	81	"	XXXI c	"	181
"	XIV	"	81	"	XXXI d	"	182
"	XV	"	82	"	XXXII	"	196
"	XVI	"	82	"	XXXIII	"	211
"	XVII	"	82	"	XXXIV	"	211
"	XVIII	"	82	"	XXXV	"	212
"	XIX	"	93	"	XXXVI	"	212
"	XX	"	94	"	XXXVII	"	217
"	XXa	"	94	"	XXXVIII	"	245
"	XXI	"	94	"	XXXIX	"	246
"	XXII	"	94	"	XL	"	247
"	XXIIa	"	95	"	XLI	"	248

Abkürzungen in Hdb. VI, 3

ETZ = Elektrotechnische Zeitschrift (Berlin).

Z. f. E. = Zeitschrift für Elektrotechnik (Wien).

L'Écl. É. = L'Éclairage Électrique (Paris).

El. World = Electrical World and Engineer (New York).

TEICHMÜLLER, El. Leitungen = J. TEICHMÜLLER, Die elektrischen Leitungen.
1. Teil. Stuttgart, 1899.

HERZOG-FELDMANN, El. Leitungen = HERZOG-FELDMANN: Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze. Berlin. 1. Aufl. 1893; 2. Aufl. 1903.

GALILEO FERRARIS, Wissensch. Grundlagen = Wissenschaftliche Grundlagen der Elektrotechnik. Leipzig, 1901.

Zusammenstellung der durchgehend in Hdb. VI, 3 gebrauchten Symbole und ihrer Bedeutung.

E = Spannung (Volt) zwischen zwei Leitern.

\mathcal{E} = Spannung (Volt) zwischen einem Leiter und dem neutralen Punkt des Systems oder Erde.

ϵ = maximaler Spannungsverlust (Volt); im besonderen: ϵ_v Spannungsverlust bis zum v^{ten} Abzweigpunkte; $\epsilon_{\mu v}$ Spannungsverlust in der Strecke μv .

$\mathcal{Q}_{\mu v}$ = Spannungsverlust (Volt) im Knotenpunkt μ (v) des Netzes, wenn der Knotenpunkt v (μ) allein mit der Stromeinheit belastet ist.

J = Stromstärke (Amp.); im besonderen: J_v Belastungsstrom im Knotenpunkt v ; $(J_v)_I$ der dem Knotenpunkt v von I aus zufließende Teilstrom bzw. der auf I übertragene Teilstrom von J_v ; $J_{\mu v}$ Leiterstrom in der Strecke μv .

i = Abzweigstrom (Amp.); im besonderen: i_v Abzweigstrom im Punkte v einer Strecke; i_{vI} der der Abzweigung v von I aus zufließende Teilstrom bzw. der auf I übertragene Teilstrom von i_v .

j = Stromdichte (Amp. mm⁻²); bei komplexen Größen bedeutet j die imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$.

\vec{E} , $\vec{\mathcal{E}}$, $\vec{\epsilon}$, \vec{J} , \vec{i} = Vektoren bei Wechselstromberechnungen.

E_w , \mathcal{E}_w , ϵ_w , J_w , i_w = Energiekomponente der Vektoren.

E_l , \mathcal{E}_l , ϵ_l , J_l , i_l = energielose Komponente der Vektoren.

- \mathfrak{E} = Energie, Leistung (Watt).
 ϵ = Energieverlust (Watt).
 w = OHMScher Leiterwiderstand (Ohm); im besonderen: w_r Widerstand eines einfachen Leiters bis zum Abzweigpunkte r , $w_{\mu r}$ Widerstand der Strecke μr .
 r = Nutzwiderstand (Ohm).
 Z, z = Impedanz (Ohm).
 x = Reaktanz (Ohm).
 ρ = Spezifischer Widerstand (Ohm, m^{-1} , mm^2).
 g = Leitfähigkeit (Ω^{-1}); im besonderen: g_r und $g_{\mu r}$ wie vorher; g_{rr} Summe der im Knotenpunkte r zusammenlaufenden Leitfähigkeiten.
 Y, y = Admittanz (Ω^{-1}).
 b = Suszeptanz (Ω^{-1}).
 L = Induktivität (Henry).
 C = Kapazität (Mikrofarad).
 A = Ableitung (Ω^{-1}).
 l = einfache Länge (m) eines Leiters; im besonderen: l_r und $l_{\mu r}$ wie oben.
 q = Querschnitt (mm^2).
 V = Volumen (cm^3) eines Leiters.
 p = Frequenz (Perioden Sek^{-1}).
 $\omega = 2\pi p$ = Periodenzahl in 2π Sekunden.
 φ = Phasenverschiebungswinkel.
 \angle = vorwinklig.
 \sphericalangle = nachwinklig.
 e = Basis des natürlichen Logarithmensystems.

Druckfehler - Berichtigungen.

- Seite 3 Zeile 6 von unten lies: Gleich- anstatt gleich
" 14 " 14 und 11 von unten lies: Watt-Std. anstatt Watt
" 18 " 8 von unten lies: $\mathfrak{E} =$ anstatt $\mathfrak{E} =$
" 62 " 1 " " " $g - jb$ " $g + jb$
" 72 " 2 " " " OC " $O\mathfrak{E}$
" 75 " 14 " " " (92) " (105)
" 81 " 4—6 von oben lies: $\frac{\Sigma}{r}$ " $\frac{\Sigma}{1}$
" 87 " 14 von oben lies: (107) " (108)
" 93 " 12 " " " Fig. 66 a " Fig. 67
" 94 " 14 " " " $\frac{k+1}{\Sigma i_r} < J_{II}$ " $\frac{k+1}{\Sigma i_r} J'_{II}$
" 203 " 1 " unten " $\beta l^2 \sigma$ " $\zeta \beta l^2 \sigma$
Infolgedessen ist in den Gleichungen der Seiten 204 und 205, sowie in den Gleichungen 201, 205 bis 208 und XXXIII bis XXXVI das ζ ebenfalls zu streichen.
" 206 Zeile 2 von oben lies: $\frac{1}{2} l^2 \sigma$ anstatt $\frac{1}{2} \zeta l^2 \sigma$
" 206 " 5 " " " $n_1 \zeta i E = 2 n^2 \zeta i E$ anstatt $n_1 i E = 2 n^2 i E$
" 240 " 2 " unten " kleiner anstatt grösser.

Wiewohl die Grundlagen zur Berechnung von Leitungsnetzen bereits mit dem OHMSchen und den KIRCHHOFFSchen Gesetzen seit dem Jahre 1825 bzw. 1846, besonders auch nach der Darstellung MAXWELLS in seinem Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus¹⁾ in unmittelbarer Anwendung auf verzweigte Stromleiter, vollkommen gegeben waren, entstanden die ersten hierauf bezüglichen theoretischen Arbeiten der elektrotechnischen Litteratur erst, nachdem bereits eine Reihe von Centralen gebaut und deren Netze verlegt waren; auch hier hinkte die Theorie der Praxis nach. Die ersten Netze wurden mangels theoretischer Grundlagen von den Praktikern nicht berechnet, sondern in einem verjüngten Modell dargestellt und an ihm durch Messung der Strom- und Spannungsverteilung ermittelt, welche der nach Gutdünken angenommenen Leiterquerschnitte geändert werden mussten. Eine Vorrichtung, durch die auf mechanischem Wege Querschnitt, Belastung und Spannungsverteilung eines Netzes an einem solchen Modell festgestellt werden kann, hat sich noch 1892 H. HELBERGER patentieren²⁾ lassen, doch hat der Apparat keinerlei praktische Bedeutung erringen können, da, wie unmittelbar einleuchtet, diese Methode die teuerste und umständlichste unter allen Methoden der Netzdimensionierung ist.

Die erste Arbeit über Leitungsberechnung ist die von Sir WILLIAM THOMSON³⁾ im Jahre 1881 erschienene Betrachtung über die Wirtschaftlichkeit von Leitungsanlagen; sie bezog sich jedoch nicht auf eigentliche geschlossene Netze, sondern auf offene Leiter. Ihr folgten in den Jahren 1883 ff. eine Reihe von Arbeiten,⁴⁾ die denselben Stoff behandelten.

Die ersten theoretischen Veröffentlichungen über Berechnung von geschlossenen Leitungsnetzen waren die von C. HOCHENEGG in der Zeitschrift

1) Übersetzt von WEINSTEIN, 1883.

2) D. R. P. No. 68918 vom 5. April 1892; die Beschreibung siehe ETZ 1893, S. 495.

3) Siehe die Fussnote 1 auf S. 12.

4) W. SIEMENS, Vortrag über Berechnung von Leitungen siehe ETZ 1883, S. 109; vgl. auch die Fussnoten auf S. 12 u. 13.

für Elektrotechnik, Wien, vom Jahre 1887, die die später in seinem Lehrbuche¹⁾ gesammelten graphischen Berechnungsmethoden behandelten. 1890 beschrieben HERZOG und STARK in der ETZ ihre Theorie der Schnittmethode, und nun war die Aufmerksamkeit der Theoretiker auf das fruchtbare Feld der Netzberechnung gelenkt. In rascher Folge erschienen die Arbeiten von MÜLLENDORFF, HERZOG-FELDMANN, COLTRI, TEICHMÜLLER u. a., die die verschiedenen, hier näher zu behandelnden Methoden der Leitungsberechnung entwickelten.

1) Siehe Fussnote 3 auf S. 13.

Die Berechnung offener Leitungen.

Die offene Leitung mit nur einer Belastung.

Jede Energieübertragungsanlage besteht aus den Energieerzeugern, den Energieverbrauchern und den beide Gruppen verbindenden Leitungen. Die etwa zwischen den Erzeugern und Verbrauchern zwischengeschalteten Spannungs- oder Stromumwandler (Transformatoren, Umformer) erscheinen gegenüber den Energieerzeugern als Verbrauchsapparate, gegenüber den eigentlichen Verbrauchsapparaten als Erzeuger. Hier haben wir es nur mit der Bemessung der Leitungen zu thun, also mit der Berechnung der Leitungswiderstände, denen gegenüber die Verbrauchsapparate, die sich entweder nur als Widerstände darstellen (Glühlampen, Heizwiderstände) oder als Widerstände, die mit einer EMGK behaftet sind und durch einen äquivalenten Widerstand ersetzt werden können (Motoren, Bogenlampen, Transformatoren), als Nutzwiderstände bezeichnet werden, da in ihnen die nützliche Verwendung der zugeführten Energie vor sich geht.

1.
Nutzwider-
stand und
Leitungs-
widerstand.

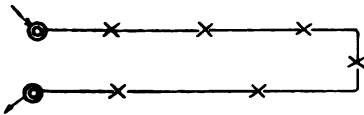


Fig. 1.

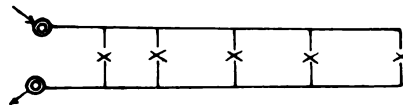


Fig. 2.

Offene Leitungen sind solche, die eine nur einseitige Stromzuführung besitzen (Fig. 1 u. 2), während als geschlossene Leitungen ganz allgemein solche bezeichnet werden, die ihren Strom von zwei oder mehr Seiten her erhalten können, sei es, dass sie wirklich kreisförmig geschlossen sind und eine (Fig. 3) oder mehrere Stromzuführungen (Fig. 4) besitzen, sei es, dass sie aus nicht in sich geschlossenen Strängen bestehen, denen von allen freien Enden her Strom zugeführt wird (Fig. 5 u. 6).

2.
Offene und
geschlossene
Leitungen.

Der einfachste offene Stromkreis ist der gleich- oder einphasige Wechselstromkreis mit nur einer Belastung (Fig. 7). Er besteht aus der Hin- und Rückleitung und dem Nutzwiderstand. Haben Hin- und Rückleitung den gleichen Widerstand, so zeichnet man gewöhnlich nur eine dieser Leitungen und deutet anstatt des Nutzwiderstandes den durch ihn verbrauchten Strom an (Fig. 8).

3.
Berechnung
einer
offenen
Leitung mit
einer
Belastung.

Tabelle I.

Belastungstabelle für einfache im Erdboden verlegte Gleichstromkabel bis 700 Volt mit und ohne Prüfdraht.

Querschnitt in mm ²	Stromstärke in Amp.	Stromdichte Amp./mm ²	Querschnitt in mm ²	Stromstärke in Amp.	Stromdichte Amp./mm ²
16	140	8·8	185	530	2·9
25	175	7·0	240	615	2·6
35	215	6·1	310	705	2·3
50	260	5·2	400	810	2·0
70	315	4·5	500	920	1·8
95	370	3·9	625	1040	1·7
120	420	3·5	800	1190	1·5
150	475	3·2	1000	1350	1·3

Der Tabelle ist als zulässige Übertemperatur 25° C. und eine Verlegungstiefe von 70 cm zu Grunde gelegt. Bei ungünstigen Abkühlungsverhältnissen, wie z. B. bei Anordnung von Kabeln in Kanälen und dergleichen, oder Anhäufung von Kabeln im Erdboden empfiehlt es sich, die Höchstbelastung auf $\frac{3}{4}$ der in der Tabelle angegebenen Werte zu ermässigen. —

Da für Freileitungen überhaupt keine Vorschriften vorhanden sind, so wird man sie am besten für eine Übertemperatur von gleichfalls ungefähr 25° C. berechnen. Wie die Versuche von KENELLY an Drähten, die bei ruhiger Luft im Freien aufgehängt waren (vgl. Hdb. VI, 1, S. 23), ergeben haben, decken sich für diese Erwärmung und für die bei Freileitungen in Frage kommenden Querschnitte von 10 bis etwa 100 mm² die unter diesen Bedingungen zulässigen Belastungen mit den in der Tabelle I angeführten Zahlen. Wir werden also im folgenden diese Belastungen allgemein als zulässig betrachten, wenn es sich um oberirdische oder unter Erde verlegte Leitungsnetze handelt.

Beispiele.

1. Es soll eine Gruppe von 20 Glühlampen, von denen jede bei 100 Volt Klemmenspannung 0·5 Amp. verbraucht, durch eine Leitung von $l = 50$ m Länge von einer Stromquelle aus gespeist werden, deren Spannung 102 Volt beträgt.

Hier ist also $2\varepsilon = 102 - 100 = 2$ Volt und $J = 20 \cdot 0\cdot5 = 10$ Amp., ferner ist bei der mittleren Temperatur von 20 bis 25° C. $\varrho = 0\cdot018$ (s. Tab. 1, Hdb. VI, 1, S. 3), da Kupferdraht verwendet wird. Es berechnet sich also der Querschnitt der Leitung zu:

$$q = 0\cdot018 \cdot \frac{50 \cdot 10}{1} = 9\cdot00 \text{ mm}^2.$$

Da in der Praxis jedoch fast ausschliesslich die vom Verband Deutscher Elektrotechniker festgelegten Normalquerschnitte (Tab. I und Hdb. VI, 1, S. 24, Tab. 16) auf Lager gehalten und verwendet werden, so wählen wir den nächst grösseren von 10 mm², entsprechend einem Durchmesser von 3·5 mm.

Hätte man bei dieser Leitung den Spannungsverlust zu kontrollieren, so würde sich ergeben:

$$2\varepsilon = 0\cdot018 \cdot \frac{2 \cdot 50 \cdot 10}{10} = 1\cdot80 \text{ Volt.}$$

Ein Blick auf die erwähnte Tabelle 16 zeigt schliesslich, dass auch der Bedingung der Feuersicherheit Genüge gethan ist, da Drähte von 10 mm^2 mit maximal 40 Amp. belastet werden dürfen.

2. Ein Einphasen-Wechselstrommotor von 10 KW Leistung soll in einer Entfernung von 1 km an eine Centrale mit 1026 Volt Betriebsspannung angeschlossen werden. Der Leistungsfaktor des Motors beträgt $\cos \varphi = 0.90$, seine Nutzsapannung 1000 Volt.

Die maximale Betriebsstromstärke berechnet sich zu

$$J = \frac{10000}{1000 \cdot 0.90} = 11.1,$$

die Nullspannung am Anfang der Linie zu $\mathcal{E}_0 = \frac{1026}{2} = 513$ und am Ende der Linie zu

$$\mathcal{E} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ Volt.}$$

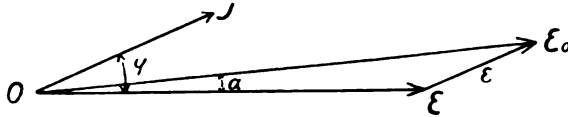


Fig. 9.

Da der Spannungsverlust ε die Richtung des Stromes hat, also dem Stromvektor J parallel ist (Fig. 9), so findet man

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sqrt{\mathcal{E}_0^2 + \mathcal{E}^2 - 2 \mathcal{E}_0 \mathcal{E} \cos \alpha} \\ &= \mathcal{E}_0 - \mathcal{E} = 13 \text{ Volt,} \end{aligned}$$

denn in fast allen praktischen Fällen ist $\cos \alpha$ sehr nahe gleich 1. In unserem Falle würde, da $\varphi = 25^\circ 50'$ beträgt, $\alpha = 2^\circ 40'$, also $\cos \alpha = 0.999$ werden. Demnach wird:

$$q = 0.018 \cdot \frac{1000 \cdot 11.1}{13} = 15.4,$$

wofür wir aus den gleichen Gründen wie vorher $q = 16 \text{ mm}^2$ wählen.

Die Elastizität einer Anlage.

Wie wir bereits gesehen haben, werden die Energieverbraucher (Lampen, Motoren) für eine bestimmte Spannung gebaut, die an ihren Klemmen vorhanden sein muss, damit sie gut arbeiten. Schwankungen in der Klemmenspannung werden das gleichmässige und gute Funktionieren der verschiedenen Apparate mehr oder minder beeinträchtigen und daher zu vermeiden sein. Der empfindlichste Verbrauchsapparat in dieser Beziehung ist die Glühlampe, bei der bereits plötzliche Spannungsschwankungen von mehr als 2% Lichtschwankungen zur Folge haben, die sich für das Auge unangenehm bemerkbar machen. Die Grenze der zulässigen Spannungsschwankung einer Anlage, die Glühlampen speist, beträgt demnach 2% der Nutzsapannung. Wenn plötzliche Spannungsschwankungen nicht zu befürchten sind, wie in grösseren

5.
Schwan-
kungen der
Nutz-
spannung.

Netzen, lässt man auch bis zu 3% Spannungsverlust zu. Grössere Abweichungen der Nutzspannung von ihrem normalen Werte müssen durch Regelung der Maschinenspannung oder auf sonst eine Weise vermieden werden.

So entstehen bei einer Anlage, die mit konstanter Maschinenspannung betrieben wird, Spannungsänderungen an den Lampenklemmen, wenn einzelne der vorhandenen Lampen oder Gruppen solcher ein- oder ausgeschaltet werden, da hierdurch der Widerstand des Stromkreises und daher der die Leitung durchfliessende Strom geändert wird. Die Folge hiervon ist eine Zu- oder Abnahme des Spannungsverlustes (Gleichung (2) [3]), und somit erzeugt eine Vermehrung der Lampen eine Erniedrigung, eine Verminderung eine Erhöhung der Nutzspannung.

Beträgt der maximale Spannungsverlust zwischen den Klemmen der Maschine und denen der Lampen nicht mehr als 2 bzw. 3% der Nutzspannung, so können offenbar ebensowohl alle Lampen als auch nur eine eingeschaltet sein, ohne dass eine Regelung der Maschinenspannung erforderlich wird. Anders dagegen, wenn der maximale Spannungsverlust zu mehr als 3% berechnet ist.

6.
Definition
der
Elastizität.

Wir wollen nun sagen: Die Leitungsanlage (oder auch ein Teil derselben) besitzt eine Elastizität von 100% (genauer von $100 \cdot \frac{n-1}{n} \%$), wenn alle Lampen bis auf eine aus- bzw. eingeschaltet werden können, ohne dass die Klemmspannung mehr als 2 bzw. 3% der Nutzspannung steigt oder fällt, und allgemein, die Elastizität beträgt $100 \cdot p \%$, wenn unter der gleichen Bedingung $p \cdot n$ Lampen aus- oder eingeschaltet werden können. Unter n ist die Anzahl der Lampen verstanden, für welche die Leitung berechnet ist. Offenbar beruht die Elastizität einer Anlage auf einem gewissen Verhältnis der Nutzwiderstände zu den Leitungswiderständen, wie bei den einzelnen Schaltungsarten noch näher gezeigt werden wird.

Wie ersichtlich, ist die Elastizität einer Anlage mitbestimmend für die Beurteilung ihrer Güte und Brauchbarkeit und daher für die Vergleichung verschiedener Netze mit ausschlaggebend.

Offene Leitungen mit verteilter Belastung.

7.
Schaltungs-
arten.

Ist die Belastung örtlich verteilt, so kann die Schaltung, d. h. die Verbindung der verschiedenen Energieverbraucher durch die Leitungen in zwei wesentlich verschiedenen Arten erfolgen, nämlich in Hintereinander-, Reihen- oder Serienschaltung und in Nebeneinander- oder Parallelschaltung. Aus beiden Arten ergibt sich durch Kombination die Gruppenschaltung.

Die Reihenschaltung.

8.
Verbindung
der Nutz-
widerstände
bei Reihen-
schaltung.

Bei der Reihenschaltung werden alle Nutzwiderstände zu einem einfachen Stromkreise vereinigt, indem jede Polklemme eines Apparates mit der eines andern bzw. mit einer Klemme des Energieerzeugers verbunden wird (Fig. 10). Da in einem einfachen Stromkreise nur eine Stromstärke herrschen kann, so müssen natürlich sämtliche Verbrauchsapparate für den gleichen Strom gebaut sein. Dagegen können die Spannungen der einzelnen Apparate verschieden

sein. Ist der Energieverbrauch eines Apparates, z. B. eines Motors, veränderlich, so wird auch die Spannung an seinen Klemmen veränderlich sein, da der Energieverbrauch bei konstanter Stromstärke der Spannung proportional ist.

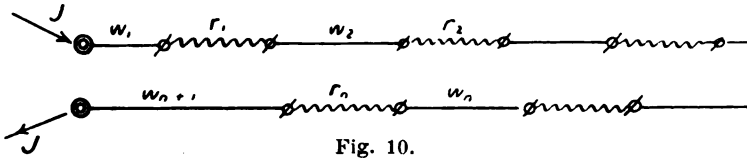


Fig. 10.

Ist Σr die Summe der eingeschalteten Nutzwiderstände bzw. bei Vorhandensein von EMGKK der äquivalenten Widerstände, Σn die Summe der Leitungswiderstände, ferner E die an den Klemmen des Stromkreises herrschende Spannung und J dessen Stromstärke, so ist nach dem zweiten KIRCHHOFFSchen Gesetz:

9.
Berechnung
der Leitung
bei Reihenschaltung.

$$E = J(\Sigma r + \Sigma n) = \Sigma E' + 2\varepsilon.$$

Hierbei bedeutet $\Sigma E'$ die Summe der Nutzspannungen und 2ε den Spannungsverlust in der ganzen Leitung. Sind also die Nutzspannungen gegeben, so muss die Maschinenspannung um den Spannungsverlust grösser gewählt werden. Auch hier ist wieder $J\Sigma r = \Sigma E'$ als durch die Energieverbraucher gegeben anzusehen, so dass für die Leitungsberechnung die Gleichung folgt:

$$2\varepsilon = J\Sigma n.$$

Hat die ganze Leitung die Länge $2l$ und den Querschnitt q , so wird

$$\Sigma n = \frac{2l}{q} \rho$$

und

$$2\varepsilon = \frac{2l \cdot J}{q} \cdot \rho \quad \dots \quad (I)$$

Wir erhalten also zur Berechnung von ε oder q dieselbe Gleichung, wie früher bei dem offenen Leitungskreise mit einer einzigen Stromentnahme [3].

Eine Strecke von 1000 m Länge (etwa die beiden Seiten einer Strasse von 500 m) soll durch 20 Glühlampen von je 32 HK und 100 Watt Energieverbrauch beleuchtet werden; die Lampen sollen gleiche Abstände von je 50 m

Beispiel.

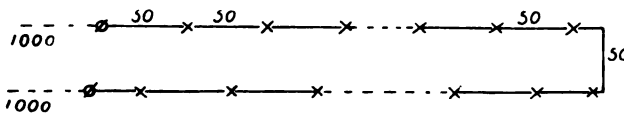


Fig. 11.

haben und die Entfernung der ersten und letzten Lampe vom Maschinenhause soll 1000 m (einfach) betragen (Fig. 11). Die zur Verfügung stehende Stromquelle habe eine Klemmspannung von 625 Volt, während die Lampen für eine Spannung von $E' = 30$ Volt und demgemäss für einen Strom von $J = 3.3$ Amp. gebaut seien. Es soll der Querschnitt der Kupferleitung berechnet werden.

Da $2\varepsilon = 625 - 20 \cdot 30 = 25$ Volt, $2l = 3000$ m, $q = 0.018$ ist, so wird

$$q = \frac{3000 \cdot 3.3}{25} \cdot 0.018 = 7.2 \text{ mm}^2 \doteq 7 \text{ mm}^2.$$

Dass diese Leitung auch der Feuersicherheit genügt, zeigt Tabelle I, S. 6.

Zur Zahlenrechnung sei bemerkt, dass bei allen Netzberechnungen eine Genauigkeit von etwa 1% vollkommen ausreichend ist, da ja einerseits die der Rechnung zu Grunde liegenden Annahmen gewöhnlich bei weitem diese Genauigkeit nicht erreichen, andererseits wegen der beschränkten Zahl der gebräuchlichen und fabrikationsmässig hergestellten Kabelquerschnitte die Ergebnisse auf diese abgerundet werden müssen ([3] Beispiel).

10.
Die Elastizität der Leitung bei Reihenschaltung.

Bisher wurde die Berechnung der Leitung unter der Voraussetzung durchgeführt, dass alle Lampen brennen. Ist nun die Bedingung gestellt, dass die Leitung bis zu einem gewissen Grade oder vollkommen elastisch sein soll, dass also ohne Änderung der Klemmspannung der Dynamo entweder eine gewisse Anzahl der Lampen oder alle bis auf eine abschaltbar sein sollen — was natürlich geschehen muss, ohne die Leitung zu unterbrechen, also indem die Klemmen der auszuschaltenden Lampen kurzgeschlossen werden —, so zeigt eine kurze Rechnung am vorhergehenden Beispiel, dass dieser Bedingung nicht genügt wird. Schalten wir eine Lampe ab, so vermindert sich die Summe der Nutzwiderstände, also auch der Gesamtwiderstand, da ja der Leitungswiderstand ungeändert bleibt. Ebenso bleibt die Maschinenspannung konstant, also muss der Strom und proportional zu diesem die Nutzspannung an den Lampen wachsen und es wird:

$$J_1 = \frac{E}{\Sigma w + (\Sigma r)_1}; E_1' = J_1 r.$$

Der (für verschiedene Stromstärken als konstant angenommene) Widerstand einer Lampe ist

$$r = \frac{E'}{J} = \frac{30}{3.3} = 9.1 \Omega,$$

derjenige der Leitung

$$\Sigma w = \frac{2l}{q} \cdot q = \frac{3000}{7} \cdot 0.018 = 7.7 \Omega,$$

also wird

$$\Sigma w + (\Sigma r)_1 = 7.7 + 19 \cdot 9.1 = 180.6 \Omega$$

und

$$J_1 = \frac{625}{180.6} = 3.46 \text{ Amp.},$$

während der normale Strom nur 3.3 Amp. beträgt. Die Lampen würden also schon bei Ausschaltung nur einer Lampe einen um $\frac{3.46 - 3.3}{3.3} \doteq 0.05$, also um 5% zu hohen Strom erhalten, also nicht mehr gut funktionieren.

11.
Berechnung der Leitung auf Elastizität bei Reihenschaltung.

Soll die Leitung einer Reihenschaltungsanlage auf Elastizität berechnet werden, so darf nach Abschnitt [6] und [10] die grösste Spannungs- bzw. Stromschwankung, die durch die Änderung der Lampenzahl hervorgerufen wird, höchstens 3% der Nutzspannung bzw. der normalen Stromstärke betragen. Verlangen wir also allgemein eine Elastizität der Leitung von $100 \cdot p\%$, so erhalten wir als Bedingung für die Stromänderung:

$$J_1 - J < 0.03 J \text{ oder } J_1 < 1.03 J.$$

Nun ist für n installierte Lampen

$$\Sigma r = nr, \quad (\Sigma r)_1 = (1 - p) nr$$

$$J = \frac{E}{\Sigma w + nr}, \quad J_1 = \frac{E}{\Sigma w + (1 - p) nr},$$

woraus für den zu berechnenden Leitungswiderstand folgt:

$$\Sigma w \geq \frac{1.03 p - 0.03}{0.03} nr \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

d. h. bei Reihenschaltung wächst der Widerstand einer elastischen Leitung mit der Anzahl und dem Widerstand der Energieverbraucher, sowie mit der Grösse der Elastizität. Verlangen wir also in unserm Beispiel [9] eine Elastizität von 50% ($p = 0.5$), so berechnet sich der Widerstand der Leitung zu:

$$\Sigma w \geq \frac{0.485 \cdot 20 \cdot 9.1}{0.03} = 2950 \Omega$$

und der Querschnitt zu:

$$q \leq \frac{3000}{2950} \cdot 0.018 \leq 0.0183 \text{ mm}^2.$$

Wie ersichtlich, führt die Bedingung einer auch nur mässigen Elastizität hier bereits zu Querschnitten, die weder der Feuersicherheit noch den Ansprüchen, die in bezug auf Festigkeit für die Verlegung der Leitung gestellt werden müssen, genügen. Da ferner der Spannungsverlust in der Leitung sich zu

$$2\varepsilon = J \Sigma w = 3.3 \cdot 2950 = 9735 \text{ Volt}$$

berechnen würde, so müsste die Klemmspannung der Dynamo

$$E = 9735 + 20 \cdot 30 = 10335 \text{ Volt}$$

betragen, und dieses Ergebnis führt uns auf einen weiteren Punkt, der bei der Berechnung von Leitungen berücksichtigt werden muss, nämlich auf den Wirkungsgrad bzw. die Wirtschaftlichkeit der Leitung.

Der Wirkungsgrad η einer Leitung ist das Verhältnis der Nutzleistung zu der gesamten an die Leitung abgegebenen Leistung; also:

$$\eta = \frac{\Sigma E_1 J}{J^2 \Sigma w + \Sigma E_1 J} = \frac{\Sigma E_1 J}{E J} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

12.
Wirkungs-
grad der
Leitungen.

oder da bei Reihenschaltung der gleiche Strom die Leitungs- und Nutzwiderstände durchfliesst,

$$\eta = \frac{\Sigma E_1}{E} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5a)$$

In unserem Falle würde sich demnach als Wirkungsgrad für die volle Belastung ergeben:

$$\eta = \frac{20 \cdot 30}{10335} = 0.058$$

d. h. die nutzbar verwendete Energie würde bei voller Belastung nur 5.8%, bei halber Belastung sogar nur etwa 3% der gesamten erzeugten Leistung

betragen, was natürlich vom wirtschaftlichen Standpunkte betrachtet nicht zu rechtfertigen ist.

Wir sehen also, dass die Bedingung der Elastizität bei Reihenschaltung in jeder Beziehung zu unmöglichen Ergebnissen führt. Daher wird sie bei dieser Schaltungsart nicht berücksichtigt, sondern die Leitungen werden nur unter der Bedingung des günstigsten Spannungsverlustes [17] berechnet, sofern nur der so erhaltene Querschnitt der Feuersicherheit Genüge leistet. Dann muss aber natürlich bei willkürlicher oder zufälliger Abschaltung von Energieverbrauchern die dadurch entstehende Änderung der Stromstärke durch Regelung der Maschinenspannung ausgeglichen werden, die Maschine muss auf „konstante Stromstärke“ reguliert werden, falls man es nicht vorzieht, dafür zu sorgen, dass automatisch an Stelle eines jeden abgeschalteten Nutzwiderstandes ein gleicher Ballastwiderstand tritt.

Die Wirtschaftlichkeit der Leitungsanlage.

18.
Die Thom-
sonsche
Regel und
ihre Ent-
wicklung.

Die ersten Betrachtungen über die Wirtschaftlichkeit von Leitungsanlagen sind von Sir WILLIAM THOMSON gelegentlich einer Studie über die Ausnützung der in der Natur vorhandenen Energiequellen im Jahre 1881 veröffentlicht worden¹⁾ und führten unter der Annahme, dass die Kosten für die Leitungen ihrem Gewicht proportional sind, also für blanke Kupferleitungen ohne Berücksichtigung der Verlegungskosten zur bekannten „THOMSONschen Regel“, nach welcher der wirtschaftlich günstigste Querschnitt einer Leitung derjenige ist, bei dem die durch den Anlagewert bedingten Kosten für Verzinsung und Amortisation gleich denjenigen Kosten werden, die durch den jährlichen Energieverlust in der Leitung entstehen.

Die THOMSONsche Regel wurde nur kurze Zeit in ihrer ersten Form benützt,²⁾ da die Erkenntnis, dass ihre allgemeine Gültigkeit wegen Nichtberücksichtigung einer Reihe von den wirtschaftlichen Querschnitt beeinflussenden Größen beschränkt sei, bereits im Jahre 1884 zur Aufstellung der Formel von BERINGER³⁾ und später zu der mit dieser identischen Formel von AYRTON und PERRY⁴⁾ führten. Während THOMSON die Berechnung des wirtschaftlichen Querschnittes abhängig machte von der Stromstärke, mit der die Energie übertragen werden sollte, also den Strom als bekannt voraussetzte, benützten umgekehrt die letzteren die Spannung als gegebene und für die vorzunehmende Differentiation konstante Grösse. That-

1) Sir WILLIAM THOMSON, On the sources of energy in nature available to man for the production of mechanical effect. Report of the British Association 1881, S. 518.

2) A. BERINGER, Kritische Vergleichung der elektrischen Kraftübertragungen. Berlin, JULIUS SPRINGER, 1883. WALTENHOFEN, Z. f. E. 1884, giebt eine Umformung der von THOMSON aufgestellten Formel.

3) A. BERINGER, Die Dimensionierung elektrischer Leitungen, Z. f. E. 1884, S. 449.

4) AYRTON und PERRY, Journ. of the Society of Telegraph-Engineers and Electricians 1886, Bd. 15, S. 120. Vgl. auch HAMILTON KILGOUR, El. Engineer 1890, Bd. 6, S. 496; ETZ 1891, S. 124. ANTHONY, El. Engineer 1894, 31. Okt.; Z. f. E. 1895, S. 95. EDWARD W. BURCH, El. Railway Gazette 1895, S. 60; L'Écl. Él. Bd. 5, S. 117. HOSPITALIER, L'Industrie Él. 1894; The Electrician 1894, Bd. 34, S. 235. KAPP, Elektrische Kraftübertragung, JULIUS SPRINGER, Berlin.

wo a und b Werte sind, die zwar für verschiedene Verlegungsarten und verschiedene Isolation der Leitungen sich ändern, bei einem einmal gewählten Kabel und einer bestimmten Verlegungsart dagegen für verschiedene Querschnitte die gleichen sind. Bezeichnet ferner C den Preis der notwendigen Anschlussapparate, so ergeben sich die Leitungskosten für eine Leitungslänge $2 l$ zu

$$(a + b q) 2 l + C.$$

a , b und C sind also in bezug auf die zu verwendende Spannung variabel, sie ändern sich aber nicht stetig, sondern sprunghaft, da die verschiedenen den Preis beeinflussenden Kabelisolationen stets für einen grösseren Spannungsbereich hergestellt werden und ähnliches für die Anschlussapparate gilt.

Ist der Prozentsatz für Verzinsung, Amortisation und Instandhaltung der Leitungsanlage p_l (so dass z. B. bei 5% $p = 0.05$ wird), so betragen die jährlichen Kosten für diesen Teil:

$$p_l [(a + b q) 2 l + C].$$

Die in der Leitung auftretenden Energieverluste ϵ bedingen nun eine grössere Maschinenleistung, als der reinen Nutzleistung entspräche; die für diesen Teil der Maschinenkosten aufzuwendenden Amortisations- und Verzinsungsquoten müssen also gleichfalls den Leitungskosten zugerechnet werden. Betragen die Kosten der in Frage kommenden Maschinenanlage a Mark für 1 Watt — auch a , ebenso wie p_l sind von Spannung abhängig —, und ist für Verzinsung, Amortisation und Instandhaltung ein Prozentsatz p_0 aufzuwenden, so erhalten wir die für diesen Teil der Anlage einzusetzenden Kosten zu

$$p_0 a \epsilon$$

und somit für die gesamten durch das Anlagekapital bedingten „Stromfortleitungskosten“

$$p_l [(a + b q) 2 l + C] + p_0 a \epsilon. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

16. Der durch den Energieverlust bedingte Arbeitsverlust während der Kosten der Zeit dt berechnet sich zu Energieverluste.

$$\epsilon_t dt = i_t^2 r dt \text{ Watt,}$$

wenn ϵ_t bzw. i_t veränderliche Augenblickswerte bedeuten. Wird dieser Ausdruck über den Zeitraum eines Jahres integriert und betragen die Betriebskosten der Anlage für 1 Watt β Mark, so ergeben sich die durch Stromwärme verursachten jährlichen Kosten zu

$$\beta \int \epsilon_t dt = \beta r \int i_t^2 dt.$$

Da nun der Strom nicht für jeden Augenblick bekannt ist, besonders wenn es sich um eine erst zu projektierende Anlage handelt, so muss an Stelle des Integrals ein Wert gesetzt werden, der unter Benutzung von Erfahrungszahlen aus ähnlichen Betrieben eine einfache Berechnung der Betriebsverluste gestattet. Mit HOCHENEGG setzen wir als Näherungswert:

$$\int i_t^2 dt \doteq J^2 \Sigma \left(\frac{i}{J} \right)^2 t = J^2 T, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

wo nunmehr i den während der Zeit t (z. B. während einer Stunde) als konstant betrachteten Mittelwert des Stromverbrauchs und J den Maximalwert

Maschinen, Kabel u. s. w. für einen grösseren Spannungsbereich, also etwa bis 1000, für 1000 bis 5000 Volt u. s. w., mit gleicher Isolation gebaut werden, so werden die Preise derselben, also auch die Werte von a , b u. s. w., sich für bestimmte Werte von E sprungweise erhöhen; die Kurve (ϵ , E) wird also nicht kontinuierlich verlaufen, aber doch irgendwo ein Minimum zeigen. Es kann allerdings auch vorkommen, dass diese Kurve überhaupt kein absolutes Minimum ergibt, z. B. dann, wenn man aus Gründen der Betriebssicherheit oder wegen anderer Erwägungen nicht zu entsprechend hohen Spannungen übergehen will oder kann. In diesem Falle wird man eben das durch den tiefsten Punkt der Kurve gegebene ϵ_w innerhalb des praktischen Spannungsbereiches wählen.

Differenzieren wir also für konstante E nach ϵ , so erhalten wir als wirtschaftlichen Energieverlust:

$$\epsilon_w = \frac{2 l \mathfrak{E}}{E} \sqrt{\frac{p_1 b q}{p_0 a + T \beta}} = 2 l q \cdot \frac{\mathfrak{E}}{E} \sqrt{\frac{p_1 b / q}{p_0 a + T \beta}}.$$

Die Grössen a und C kommen in dieser Gleichung nicht mehr vor, die wirtschaftlichen Grössen sind also von diesen beiden, die Anlagekosten beeinflussenden Faktoren unabhängig.

HOCHENEGG nennt $\sqrt{\frac{p_1 b}{q}} = z_L$ die „Leitungszahl“ und $\sqrt{p_0 a + T \beta} = z_B$

die „Betriebszahl“, da der erste Ausdruck nur solche Konstanten enthält, die von der Leitungsanlage, der letztere nur solche, die vom Betrieb abhängen, und daher Erfahrungszahlen darstellen, die für alle ähnlichen Betriebe Geltung haben. Führen wir diese Abkürzungen ein, so ergeben sich für die wirtschaftlichen Grössen die folgenden einfachen Beziehungen:

$$\epsilon_w = 2 l q \frac{\mathfrak{E}}{E} \cdot \frac{z_L}{z_B} = 2 l q J \cdot \frac{z_L}{z_B} \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

$$2 \epsilon_w = \frac{\epsilon_w}{J} = 2 l q \cdot \frac{z_L}{z_B} \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

$$q_w = \frac{l J}{\epsilon_w} \cdot q = J \frac{z_B}{z_L} = \frac{\mathfrak{E}}{E} \cdot \frac{z_B}{z_L} \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

und für die wirtschaftliche Stromdichte:

$$j_w = \frac{J}{q_w} = \frac{z_L}{z_B} \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

18.
Fortsetzung.

Wie die letzte Gleichung zeigt, ist die wirtschaftliche Stromdichte unabhängig sowohl von der Höhe der zu übertragenden Energie als von der der Spannung und für gleiche Leitungsführung und gleiche Betriebsverhältnisse konstant. Wird ihr Betrag grösser, als der Bedingung der Feuersicherheit entspricht, so muss natürlich von der wirtschaftlichen Stromdichte Abstand genommen und die grösste zulässige Stromdichte angewendet werden.

ϵ_w ist ebenfalls von der Belastung unabhängig und wächst proportional mit der Länge der Leitung. ϵ_w , also auch ϵ_w , kann daher bei sehr langen Leitungen sehr gross werden, so dass die zu erzeugende Leistung im Verhältnis zur nutzbaren Energie sehr gross, der Wirkungsgrad der Leitung mithin sehr klein werden würde. Auch in diesem Falle bleiben der berechnete

Energieverlust, der Querschnitt u. s. w. noch die „wirtschaftlichen“ Grössen dieser Anlage, d. h. jede andre Wahl dieser Grössen würde unter den bestehenden Verhältnissen die Kosten der Anlage vergrössern. Wenn nun auch die wirtschaftlichen Grössen die günstigsten sind, die man für die Dimensionierung der Leitung annehmen kann, so folgt natürlich daraus noch nicht, dass nun auch der Betrieb der Anlage gewinnbringend sein muss. Der Gewinn hängt ja nicht nur von den Ausgaben ab, die für die Berechnung der wirtschaftlichen Grössen allein massgebend waren, sondern auch von den Einnahmen, die durch den Betrieb herausgewirtschaftet werden können. Erst eine Gegenüberstellung der Einnahmen und Ausgaben vermag über den zu erzielenden Gewinn oder über die Möglichkeit, eine Anlage gewinnbringend zu betreiben, Aufschluss zu geben. Die Einhaltung der wirtschaftlichen Grössen verbürgt aber, dass bei gegebenem Verkaufspreise der nutzbaren Energie der erreichte Gewinn der grösste ist, der unter den gegebenen Verhältnissen erzielt werden kann.

2. Die am Erzeugungsort vorhandene Energie ist gegeben.

Die sämtlichen Betrachtungen und Ergebnisse des ersten Falles bleiben bestehen, wenn \mathcal{E}_0 an Stelle von \mathcal{E} und E_0 für E eingesetzt wird, da ja ^{19.} Fortsetzung. wegen Gleichung (11) auch dann die Gleichung (12) für K richtig bleibt.

Die Schlussgleichungen lauten dann:

$$e_w = 2 l \varrho \frac{\mathcal{E}_0}{E_0} \frac{z_L}{z_B} = 2 l \varrho J \frac{z_L}{z_B} \quad . \quad . \quad . \quad (13a)$$

$$e_w = l \varrho \frac{z_L}{z_B} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

$$q_w = \frac{\mathcal{E}_0}{E_0} \frac{z_B}{z_L} = J \frac{z_B}{z_L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15a)$$

$$j_w = \frac{z_L}{z_B} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Auch die Folgerungen [18] bleiben bestehen, nur kann hier, da wir von einer bestimmten und begrenzten primären Energie ausgehen, der Fall ein- ^{20.} Fortsetzung. treten, dass

$$e_w > \mathcal{E}$$

wird, dass also für den nutzbaren Verbrauch gar keine oder sogar weniger als keine, eine negative Energie übrig bleiben würde. Ein derartiges Ergebnis würde eben die Anlage als absolut unmöglich kennzeichnen. Ob eine Anlage für den Fall, dass

$$e_w < \mathcal{E}$$

ist, gewinnbringend ausgenutzt werden kann, hängt auch hier von dem Wirkungsgrad, den Gestehungskosten und den Verkaufspreisen ab.

Bisher haben wir stets nur von den Kosten der Leitung, also von denen der Drähte oder Kabel einschliesslich ihrer Verlegung gesprochen. Müssen auch andere Teile der Anlage in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen einbezogen werden, so sind natürlich deren Kosten entsprechend in dem Ausdruck für K (Gleichung 10) [17] zu berücksichtigen.

^{21.} Berücksichtigung der Kosten anderer Teile der Anlage.

Nehmen wir beispielsweise den Fall, es sei eine Wasserkraft zum mechanischen Antrieb einer Fabrik auf eine bestimmte Entfernung zu übertragen, so ist die zur Verwendung kommende Spannung bei direkter Übertragung ohne Benutzung von Transformatoren auf diejenige Höhe beschränkt, für welche noch Generatoren und Motoren betriebssicher gebaut werden können. Werden dagegen am Anfang und Ende der Leitung Transformatoren zur Erhöhung und Wiederherabsetzung der Spannung eingeschaltet, so verringern sich einerseits die Kosten für Anlage und Betriebsverluste der Leitungen, da ja J proportional mit der Zunahme der Spannung abnimmt, andererseits entstehen Mehrkosten für Anschaffung und Erhaltung der Transformatoren und Bestreitung der Betriebsverluste derselben. Bedeutet γ (Mark) die Kosten der Transformatoren für 1 Watt, p_t den für Amortisation u. s. w. aufzuwendenden Prozentsatz, a_c den konstanten Arbeitsverlust, der während eines Jahres durch die Eisenverluste bedingt ist, c_k den dem maximalen Betriebsstrom entsprechenden Energieverlust im Kupfer, der also nur während der Zeit T in Ansatz zu bringen ist, so ist der einem Transformator entsprechende Teil von K :

$$\gamma \mathfrak{E} p_t + a (a_c + T c_k),$$

welcher Betrag zu verdoppeln ist, falls, wie in unserem Falle, zwei Transformatoren aufzustellen sind.

In gleicher Weise lassen sich andere Fälle berücksichtigen.

22.
Erweiterung
der Ergebnisse
auf
Wechsel-
strom.

Die in diesem Abschnitt entwickelten Gleichungen gelten zunächst nur für Gleichstrom, da wir für den Strom J den Wert $\frac{\mathfrak{E}}{E}$ und als Leitungslänge die doppelte Entfernung l des Verbrauchsgebietes vom Erzeugungsort angesetzt haben. Mit entsprechenden Änderungen gelten sie aber auch für alle anderen Stromarten und Schaltungen.

Für einphasigen Wechselstrom ist nur der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ zu berücksichtigen, da die Leistung

$$\mathfrak{E} = EJ \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

ist. Führt man die daraus erhaltene Stromstärke in die Gleichung (11) ein, so erkennt man leicht, dass die Gleichungen (13) bis (16) für einphasigen Wechselstrom gelten, wenn man $\frac{\mathfrak{E}}{E \cos \varphi}$ anstatt $\frac{\mathfrak{E}}{E}$ schreibt.

Bei Drehstrom wird, wenn E die (verkettete) Spannung zwischen zwei Leitungen bedeutet,

$$\mathfrak{E} = \sqrt{3} EJ \cos \varphi = \mathfrak{E} J \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

während $3l$ an Stelle von $2l$, 3ε an Stelle von 2ε tritt. In den Gleichungen (13) bis (16) hat man demgemäss $\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\mathfrak{E}}{E \cos \varphi}$ für $\frac{\mathfrak{E}}{E}$, $3l$ für $2l$ und 3ε für 2ε einzusetzen.

Für Zweiphasenstrom mit verketteter Spannung E wird

$$J = \frac{\mathfrak{E}}{\sqrt{2} E \cos \varphi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

der Strom in den Aussenleitern, während der Strom im Mittelleiter die Grösse $\frac{1}{\sqrt{2}} J$ annimmt und demgemäss zur Einhaltung der wirtschaftlichen Strom-

legungsarten niedergelegt, bezogen auf einen Elektrolytkupferpreis von 50 £ pro Tonne. Bei anderer Preisnotierung erhöht bzw. vermindert sich der Wert b um 0·0002 M. für jedes £ Differenz gegen den Grundpreis, so dass z. B. bei einem Preise des Elektrolytkupfers von 60 £ der neue Wert $b' = b + 0·002$ wird. Ferner sind die Werte von a und b auch bei Mehrleiterkabeln nur auf eine Ader bezogen, so dass also der Preis eines Zweileiterkabels $2 P = 2 (a + b q)$, der des Dreileiterkabels entsprechend gleich

Tabelle II.

Werte von a und b bezogen auf einen Elektrolyt-Kupferpreis von 50 £ pro Tonne, wenn $P = a + bq$ und q in mm^2 .¹⁾

Ausführung der Leitung	Maximale Betriebs- spannung Volt	Mark für 1 m	
		a	b
1. Blanke Kupferleitung, unverlegt	—	0·00	0·0130
2. Dieselbe oberirdisch verlegt auf Telegraphenstangen mit Doppelglocken - Isolatoren			
a) 2 Drähte auf einem Gestänge	—	0·23	0·0130
b) 4 " " " "	—	0·17	0·0130
c) 8 " " " "	—	0·13	0·0130
3. Bleikabel mit doppelter Eisenbandarmierung, unverlegt	1000	0·80	0·0231
4. Dieselben, verlegt			
a) 2 Kabel in einem Graben	1000	3·10	0·0231
b) 3 " " " "	1000	2·50	0·0231
c) 5 " " " "	1000	2·10	0·0231
d) 7 " " " "	1000	1·80	0·0231
5. Konzentrische Doppelkabel, armiert	1000	0·65	0·0247
6. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	1000	2·70	0·0247
7. Konzentrische Doppelkabel, armiert	3000	1·16	0·0255
8. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	3000	3·20	0·0255
9. Konzentrische Dreileiterkabel, armiert	1000	0·85	0·0224
10. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	1000	2·20	0·0224
11. Konzentrische Dreileiterkabel, armiert	2000	1·10	0·0246
12. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	2000	2·45	0·0246
13. Vorseilte Zweileiterkabel, armiert	3000	1·30	0·0358
14. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	3000	3·35	0·0358
15. Vorseilte Zweileiterkabel, armiert	5000	1·42	0·0385
16. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	5000	3·50	0·0385
17. Vorseilte Zweileiterkabel, armiert	10000	2·04	0·0405
18. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	10000	4·15	0·0405
19. Vorseilte Dreileiterkabel, armiert	3000	1·07	0·0281
20. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	3000	2·42	0·0281
21. Vorseilte Dreileiterkabel, armiert	5000	1·30	0·0309
22. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	5000	2·65	0·0309
23. Vorseilte Dreileiterkabel, armiert	10000	1·77	0·0323
24. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	10000	3·15	0·0323

1) Die Werte sind nach dem Deutschen Kalender für Elektrotechniker berechnet und entsprechen den Preisnotierungen des laufenden Jahres (1905). Vgl. auch LEO W. COHN Beitrag zur Kostenberechnung elektrischer Leitungen, ETZ 1902, S. 260.

α zwischen 0,9 und 1,7 Mk. ansetzen. Der entsprechende Wert für die Anlagekosten bei Akkumulatoren ist 0,5 bis 0,8 Mk.

27. Die Betriebskosten für eine erzeugte Wattstunde, also der Wert β [16],
 Werte von β . enthalten die Betriebsmaterialkosten (Kohlen, Schmier- und Putzmaterial u. s. f.),
 Löhne und Verwaltungsunkosten, die nach den örtlichen Verhältnissen ver-
 schieden sein werden, und hängen ausserdem von der Grösse und der mehr
 oder minder günstigen Belastung der Antriebsmotoren sowie von der Betriebs-
 art ab, also ob Wasser, Dampf oder Gas die Antriebskraft bilden.

Der billigste Betrieb wird natürlich im allgemeinen bei Wasserkraftanlagen zu erreichen sein, sofern bei diesen, abgesehen von dem Anlagekapital bezw. von der zu zahlenden Miete, nur Löhne, Schmier- und Putzmaterial als Betriebskosten zu berücksichtigen sind. Nur in dem Falle, dass kostspielige Wasserbauten oder wegen ungünstiger Wasser- und Eisverhältnisse grosse Ausgaben für Reparaturen der Stau- und Kanalanlagen in Frage kommen, oder wenn die Energiequelle sehr weit von der Verbrauchsstelle entfernt ist, wird eine Wasserkraft weniger rentabel werden können, als eine Dampf-anlage. Die Entscheidung wird dann natürlich nur auf Grund einer eingehenden Berücksichtigung aller Verhältnisse zu gewinnen sein. Je nach der Grösse der Anlage kann man bei Überschlagsrechnungen in normalen Fällen für β den Wert 20 bis $100 \cdot 10^{-6}$ Mk. einsetzen.

Bei Dampfanlagen ist neben der Grösse der Maschinenaggregate die Belastung derselben ausschlaggebend. Müssen die Maschinen während eines grossen Theiles des Tages schwach belastet laufen, so wird der Kohlenverbrauch sehr viel grösser ausfallen, als wenn dieselben bei stets voller oder doch nahezu voller Belastung arbeiten. Ist also der Energieverbrauch bei Tage bezw. in den späten Nachtstunden gegenüber der Hauptbetriebszeit sehr klein, so wird man neben den grossen Maschinensätzen auch ein diesem Verbrauch entsprechendes kleineres Aggregat aufstellen, falls man es bei Gleichstromanlagen nicht vorzieht, Akkumulatorenbetrieb vorzusehen und dadurch eine stets volle Belastung der Maschinen zu ermöglichen. Ausgeführte Anlagen haben je nach Grösse und Verhältnissen für β den Wert 100 bis $200 \cdot 10^{-6}$ Mk. ergeben.¹⁾

Leider geben die in der ETZ jedes Jahr veröffentlichten Statistiken der bestehenden Elektrizitäts-Werke über diese Zahl keinerlei Aufschluss, so dass Mittelwerte für die verschiedenen Klassen von Anlagen nicht zur Verfügung stehen. HOCHENEGG berechnet in seinem bereits erwähnten Buche auf Grund von Betriebsangaben, die sich über ein Jahr erstrecken, für eine Beleuchtungs-Centrale von ungefähr 10 000 angeschlossenen Lampen eine durchschnittliche volle Verlustdauer von etwa 500 Stunden, bei einer Dauer des vollen Betriebes (siehe weiter unten) von $\mathfrak{T} = 1200$ Stunden und einer maximalen gleichzeitigen Belastung von 60% der angeschlossenen Lampen. O. v. MILLER und W. H. LINDLEY ermitteln für die Centrale von Frankfurt am Main¹⁾ bei einer Maximalbelastung von 21 000 Lampen $T = 400$ und $\mathfrak{T} = 1200$. Die dieser Berechnung zu Grunde liegenden Diagramme sind in den Fig. 12 bis 15 dargestellt.

Von der durchschnittlichen Dauer der vollen Energieverluste ist zu unterscheiden die „jährliche Betriebsdauer der Anlage“ τ , d. h. die Anzahl der Stunden im Jahre, während der die Anlage im Betriebe ist — bei ununterbrochenem Betriebe ist $\tau = 8760$ Stunden —, und die „durchschnittliche jährliche Dauer des vollen Betriebes“ \mathfrak{T} , d. h. diejenige Zahl von Stunden, während der die maximale Anzahl der gleichzeitig brennenden Lampen im Betrieb sein müsste, um die gleiche Zahl Lampenbrennstunden zu erzielen, die durch den thatsächlichen Betrieb geleistet wird. Es ist also:

$$J\mathfrak{T} = \int i dt = \Sigma i t$$

genommen über das ganze Jahr, oder

$$\mathfrak{T} = \int \left(\frac{i}{j}\right) dt = \Sigma \left(\frac{i}{j}\right) t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

Die erste Zahl, τ , ist wichtig für die Berechnung der Betriebskosten, die letzte Zahl ist nötig, um bei gegebenem Verkaufspreise die Einnahmen der Centrale berechnen zu können. Sie hat nach den Ergebnissen der bereits erwähnten Statistik die folgenden Mittelwerte:²⁾

Tabelle III.

Durchschnittliche jährliche Dauer des vollen Betriebes \mathfrak{T}
in Stunden.

Städte	Für Beleuchtung	Für gewerbliche Zwecke
unter 10000 Einwohner	375	420
10000 bis 30000 Einwohner	352	510
30000 „ 50000 „	285	592
50000 „ 150000 „	320	477

Für die verschiedenen Verbrauchsklassen ergibt sich ferner im Mittel aus 22 Centralen die folgende durchschnittliche jährliche Benutzungsdauer aller angeschlossenen Lampen gleicher Klasse²⁾ (siehe Tab. IV):

1) O. v. MILLER und W. H. LINDLEY, Elektrizitätswerk Frankfurt am Main, Gutachten und Projekte, 1892.

2) S. FRITZ HOPPE, Was lehren die Statistiken . . .

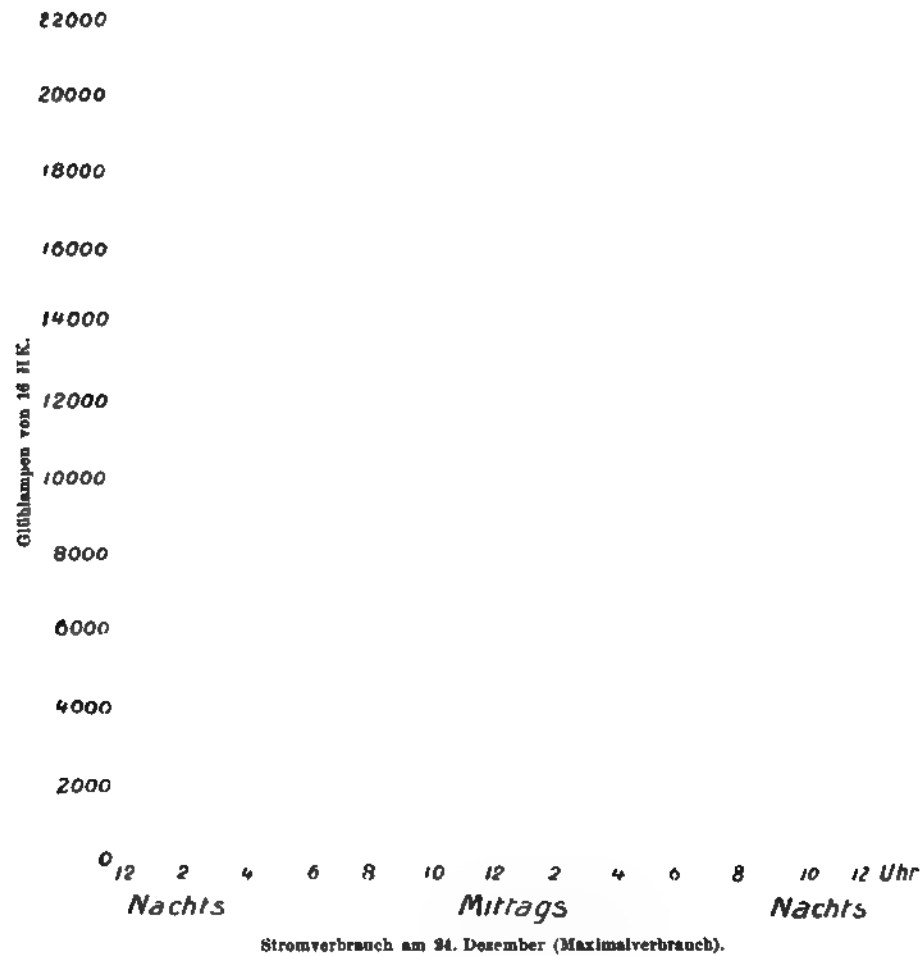


Fig. 12.

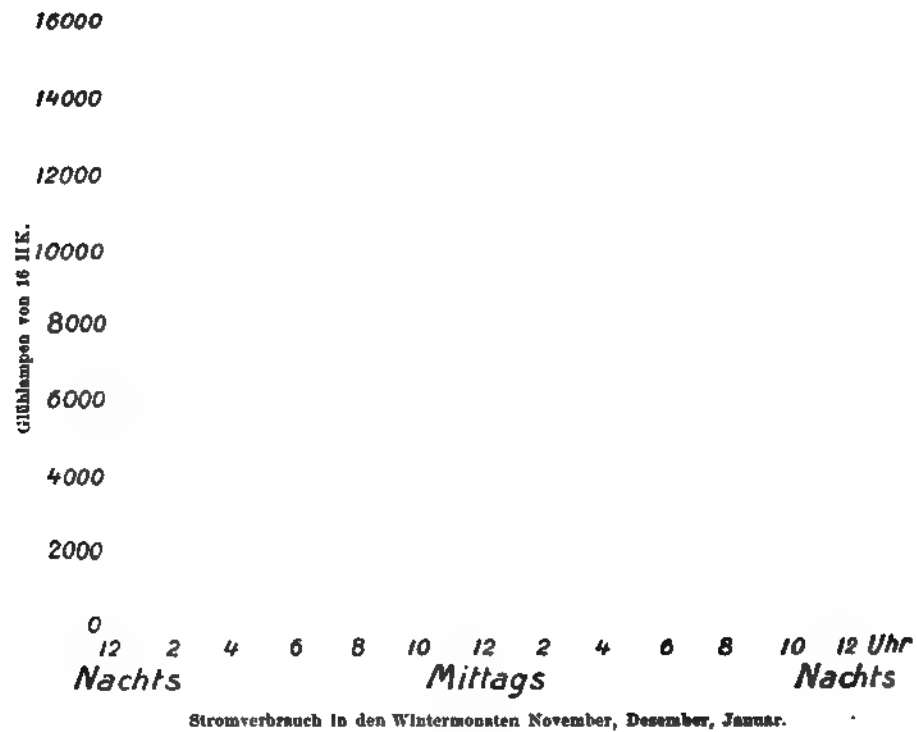


Fig. 13.

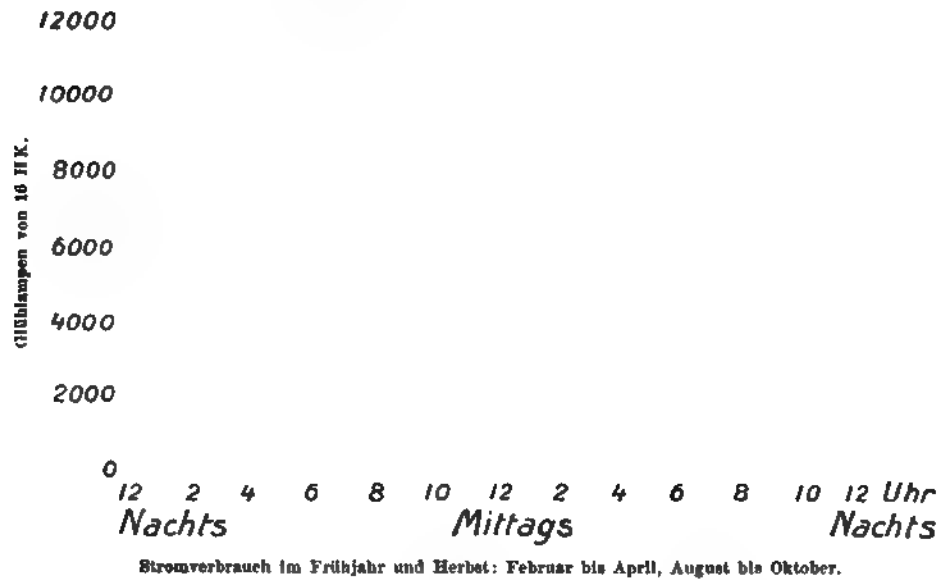


Fig. 14.

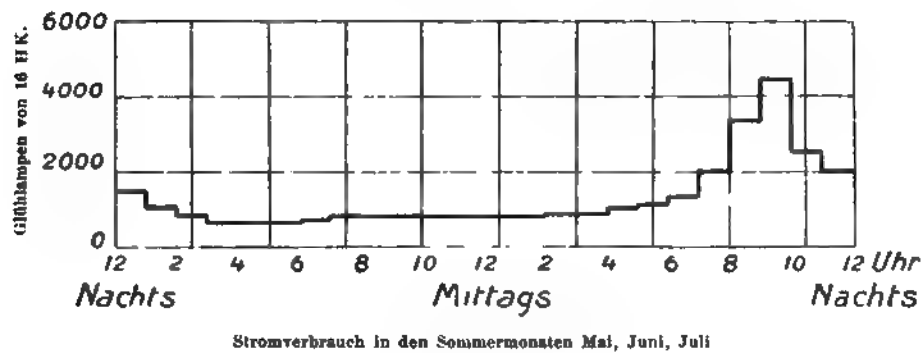


Fig. 15.

Tabelle IV.

Durchschnittliche jährliche Betriebsdauer elektrischer
Lampen verschiedener Verbraucher.

Art der Lampen	Stunden
Bahnhöfe und Postämter	1766
Öffentliche Beleuchtung	1750
Gasthöfe, Restaurants, Cafés	482
Ladengeschäfte	334
Fabriken, Werkstätten, Lagerräume	336
Banken, Geschäftsräume	323
Theater, Vergnügungsorte	300
Heil- und Pflegeanstalten	297
Museen, Kirchen	127
Wohnungen	113

Wichtig für die Netzberechnung ist schliesslich noch der „maximale gleichzeitige Energiebedarf“ im Verhältnis zu demjenigen der gesamten angeschlossenen Verbrauchsapparate. Er beträgt im Mittel bei Städten von

unter 10 000 Einwohner	35 %
10 000 bis 50 000 Einwohner	31 %
50 000 „ 150 000 „	37 %

29.
Werte von
 p_1 und p_0

Die zur Errichtung und zum Betrieb eines Elektrizitätswerkes nötigen Mittel werden im allgemeinen auf zwei Arten aufgebracht: entweder durch Anleihe (Stadtverwaltung, Unternehmungsgesellschaft) oder durch Aktienunternehmen. Im ersten Falle soll das geliehene Kapital (auch das aus eigenen Mitteln bereit gestellte Kapital ist als zu dem vorliegenden Zwecke „geliehen“ zu betrachten) durch Zahlung (Abschreibung) einer jährlichen Quote in einer bestimmten Zeit verzinst und amortisiert werden, im anderen Falle muss das Aktienkapital nach Erlöschen der Konzession, also ebenfalls nach einer bestimmten Zeit den Aktieninhabern zurückgezahlt werden. Da auch im letzten Falle die Zinsen für das Anlagekapital zu den Betriebskosten zu rechnen sind, so ist in beiden Fällen durch den Betrieb jährlich ein bestimmter Teil des Kapitals zu erbringen, der sich nach der folgenden Formel berechnet:

$$K(1+q)^n - pK \frac{(1+q)^n - 1}{q} = K - k$$

oder:

$$p = \frac{k}{K} \frac{q}{(1+q)^n - 1} + q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Hierin bedeutet p den Prozentsatz des Anlagekapitals, der jährlich für Verzinsung und Amortisation abzuschreiben bzw. zu zahlen ist, q den Zinsfuss in Prozenten, der im ersten Falle für die Anleihe zu vergüten ist, bzw. zu dem im zweiten Falle die jährlichen Abschreibungen nutzbar angelegt werden können, n die Anzahl der Jahre, in denen das Kapital amortisiert werden soll bzw. die Konzessionsdauer, K das Anlage- und Betriebskapital und k die Erneuerungskosten der Anlage abzüglich des Material-Altwerthes, also $K - k$ den Altwert der Anlage.

Der Zinsfuss q wird für die Fälle 1 und 2 verschieden anzunehmen sein, und zwar für den Fall 1 (Anleihe) nach den heutigen Verhältnissen etwa zu 0·045, für den Fall 2 (nutzbare Anlage der Abschreibungen) zu 0·035.

Die für Verzinsung und Amortisation zu berechnenden Quoten, Gleichung (21), hängen von der Wahl von n , der Anzahl der Jahre, ab. Bei ausschliesslicher Berücksichtigung der Erneuerung infolge Verschleisses ist es klar, dass für die einzelnen Teile der Anlage n verschieden gewählt werden muss, weil die Haltbarkeit derselben nicht die gleiche ist. Ist also die voraussichtliche Dauer der Benutzung kürzer als die Konzessionsdauer, so muss die erstere für n in die Rechnung eingeführt werden, da ja nach dieser Zeit voraussichtlich die betreffenden Maschinen und dergleichen ersetzt werden müssen. Ist dagegen die Dauer der Haltbarkeit grösser als die Konzessionsdauer, so wird die letztere einzuführen sein unter gebührender Berücksichtigung des nach dieser Zeit sich ergebenden Altwerthes der Anlage. Der Erneuerungsfond ist also bei der Verzinsung und Amortisation bereits berücksichtigt und kommt daher für die Rechnungen des entwerfenden Ingenieurs nicht mehr in Frage.

In den Amortisationsfond werden gewöhnlich auch die für Instandhaltung der Anlage nötigen Quoten eingeschlossen. Auch diese sind naturgemäss für die verschiedenen Teile der Anlage verschieden und Erfahrungswerte, die von Fall zu Fall je nach Güte und Art der Maschinen variieren. Mittelwerte, und zwar getrennt für Amortisations- und Instandhaltungsquoten, sind in der folgenden Tabelle V zusammengestellt. Die letzte Säule enthält Angaben der reinen Abschreibungsquoten (ohne Verzinsung), die häufig von bestehenden Elektrizitätswerken für die einzelnen Teile der Anlage in Ansatz gebracht werden.¹⁾

Tabelle V.

Amortisations- und Instandhaltungsquoten für die einzelnen Teile elektrischer Anlagen.

	Amortisationsdauer bei natürlichem Verschleiss Jahre	Erneuerungskosten mit Berücksichtigung des Alters k/K	Quote für Amortisation und Verzinsung 100 p für		de Innerekosten	
			q = 0.045	q = 0.085		
Gebäude, Schornstein, Fundamente	100	0.90	4.55	3.60	0.5	2.0
Dampfkessel	12	0.90	10.32	9.67	1.5	5.0
Vorwärmer und Reservoirs	20	0.70	6.73	5.98	1.5	4.0
Pumpen	30	0.80	5.81	5.05	2.0	5.0
Rohrleitung nebst Zubehör	30	0.90	5.98	5.25	1.0	5.0
Dampfmaschinen	20	0.80	7.05	6.33	1.5	5.0
Transmissionen	30	0.80	5.81	5.05	1.0	—
Riemen und Seile	4	0.85	24.3	23.7	2.0	—
Turbinen	30	0.80	5.81	5.05	1.5	5.0
Dynamomaschinen, Elektromotoren	25	0.70	6.07	5.30	1.5	5.0
Akkumulatoren (ohne Zubehör)	12	0.80	9.67	8.98	2.0	10.0
Mess- und Schaltapparate	10	0.90	11.82	11.17	2.0	2.5
Transformatoren	30	0.70	5.65	4.86	1.5	5.0
Kabelnetze, armiert, in den Boden verlegt	30	0.70	5.65	4.86	0.2	5.0
Luftleitungsnetze, blank, auf Stangen verlegt	10	0.50	8.57	7.76	0.8	3.3
Eiserne Maste	25	0.90	6.55	5.90	1.0	—
Hölzerne Maste	10	0.90	11.80	11.10	1.5	—
Rest der Bausumme	—	—	7.0	6.0	—	4.0

Für p_1 wäre also bei unterirdisch verlegten Kabelnetzen der Wert 0.05 bis 0.06, bei oberirdischen Leitungsnetzen 0.085 bis 0.095 einzusetzen. p_0 ergibt sich als Mittelwert der Amortisationsquoten der einzelnen Teile der Betriebsanlage, d. h. als Quotient der Summe der Amortisationsbeträge durch die Gesamtkosten der Betriebsanlage einschliesslich Grunderwerb und Bauten.

1) S. FRITZ HOPPE, Was lehren die Statistiken . . .

Als Mittelwerte können bei Überschlagsrechnungen für p_0 benutzt werden 0·07 bis 0·09 für Turbinenanlagen, 0·08 bis 0·10 für Dampfanlagen und 0·11 bis 0·12 für Akkumulatoren.

30.
Grenzwerte
von z_L , z_B
und j_w .

Für die Leitungszahl z_L und die Betriebszahl z_B ergeben sich nun die Grenzen, wenn die niedrigsten und höchsten Werte der einzelnen Grössen in die Gleichungen

$$z_L = \sqrt{p_l \frac{b}{\varrho}} \quad \text{und} \quad z_B = \sqrt{p_0 a + T\beta}$$

eingesetzt werden. Wir erhalten dann für $\varrho = 0·018$ bei einem Grundpreis des Kupfers von 40 bis 70 £ für

$$\left. \begin{array}{l} b = 0·011, \quad p_l = 0·085 : z_L (\text{Min.}) = 0·228 \\ b = 0·017, \quad p_l = 0·095 : z_L (\text{Max.}) = 0·300 \end{array} \right\} \text{ für Luftleitungen.}$$

$$\left. \begin{array}{l} b = 0·021, \quad p_l = 0·05 : z_L (\text{Min.}) = 0·242 \\ b = 0·027, \quad p_l = 0·06 : z_L (\text{Max.}) = 0·300 \end{array} \right\} \text{ für unterirdische Leitungsnetze.}$$

$$\left. \begin{array}{l} b = 0·0385, \quad p_l = 0·05 : z_L (\text{Min.}) = 0·328 \\ b = 0·0445, \quad p_l = 0·06 : z_L (\text{Max.}) = 0·386 \end{array} \right\} \text{ für verseilte Hochspannungs-} \\ \text{Zweileiterkabel (10000 Volt).}$$

Ferner wird für Dampfbetrieb, wenn als Grenzen für T die Werte 250 und 3000 (letztere für rein industrielle Betriebe mit vollbelastetem zehnstündigen Arbeitstage) angenommen werden:

$$\alpha = 0·9, \quad \beta = 100 \cdot 10^{-6}, \quad T = 250, \quad p_0 = 0·08 : z_B (\text{Min.}) = 0·31$$

$$\alpha = 1·7, \quad \beta = 200 \cdot 10^{-6}, \quad T = 3000, \quad p_0 = 0·10 : z_B (\text{Max.}) = 0·88.$$

Die wirtschaftliche Stromdichte

$$j_w = \frac{z_L}{z_B}$$

kann demnach bei Centralen mit Dampfbetrieb in normalen Fällen zwischen 0·26 und 1·25 Amp./mm² schwanken.

Beispiel.

Wir wollen nun zu unserem Beispiel auf S. 9 zurückkehren, da es sich dort um einen einfachen Fall handelt, in dem sich die Verhältnisse leicht überblicken lassen.

Gegeben war die sekundäre Nutzenergie $\mathfrak{E} = 20 \cdot 100 = 2000$ Watt und die primäre Spannung $E_0 = 625$ Volt; ferner war $2l = 3000$ m. Zu bestimmen ist also diejenige Nutzsapannung, für welche der Energieverlust und der Leitungsquerschnitt das wirtschaftliche Mass annehmen.

Es ist also:

$$\mathfrak{E}_0 = 2000 + e$$

$$J = \frac{2000 + e}{625}.$$

Wenn die volle Beleuchtung ganznächtlich ohne Rücksicht auf Mondschein stattfindet, so wird $j = 1$ und $T = \mathfrak{T} = 3650$.¹⁾ Wir nehmen Dampfbetrieb an und setzen voraus, dass die Zuleitung als Luftleitung auf Stangen ausgeführt werden soll. Es wird also für einen Kupfergrundpreis

1) Tafeln für die Beleuchtungsdauer von Sonnenuntergang bis Sonnenanfang bzw. bis zu bestimmten Stunden finden sich im Kalender von UPPENBORN.

von 50 £ ($a = 0.23$), $b = 0.013$. Ferner sei $\alpha = 1.2$, $\beta = 200 \cdot 10^{-6}$, also 0.20 Mk. für 1 KWStd, $p_l = 0.09$ und $p_0 = 0.10$, dann wird

$$z_L = \sqrt{\frac{0.09 \cdot 0.013}{0.018}} = 0.254$$

$$z_B = \sqrt{0.10 \cdot 1.2 + 3650 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0.922$$

und nach den Gleichungen (13) bis (16) unter Berücksichtigung des oben entwickelten Wertes von J :

$$j_w = \frac{0.254}{0.922} = 0.29$$

$$e_w = 3000 \cdot 0.018 \cdot 0.29 \cdot \frac{2000 + e_w}{625}$$

$$e_w = 51.3$$

$$J = \frac{2051}{625} = 3.28$$

$$2 e_w = \frac{51.3}{3.28} = 15.6$$

$$E = 625 - 16 = 609$$

$$q_w = \frac{3.28}{0.29} = 11.3 \text{ mm}^2.$$

Die Lampen müssten also für eine Spannung von 30.5 Volt gebaut sein und würden einen Strom von 3.28 Amp. verbrauchen. Da aber 11.3 mm^2 kein gebräuchlicher Querschnitt ist, so wählen wir den nächstliegenden Normalquerschnitt 10 mm^2 , der zugleich auch gemäss den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker den Festigkeitsbedingungen für Freileitungen genügt. Der diesem Querschnitt entsprechende Widerstand der Leitung berechnet sich zu $2w = 5.25 \Omega$ und die neue Stromstärke folgt aus der Gleichung:

$$\mathbb{E} + e = \mathbb{E}_0$$

oder

$$2000 + 5.25 J^2 = 625 \cdot J$$

zu $J = 3.29$ Amp. Die oben berechneten Ergebnisse bleiben also im wesentlichen bestehen.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die graphische Darstellung der jährlichen Kosten der einzelnen Teile einer Anlage abhängig vom Leistungsverlust und die nachfolgende Summierung derselben ebenfalls zu einer Ermittlung des wirtschaftlichen Leistungsverlustes führt. Diese Methode, die von G. SEMENZA¹⁾ ausgebildet ist, bietet neben ihrer Anschaulichkeit noch den Vorteil, dass sie auch darüber unmittelbar Aufschluss giebt, ob eine durch irgend welche Gründe bedingte Abweichung von dem wirtschaftlichen Energieverlust eine wesentliche Verteuerung bzw. Verschlechterung der Anlage zur Folge hat und ob die Abweichung nach der einen oder andern Seite hin günstiger ist. Hierüber sagen unsere Formeln für die wirtschaftlichen Grössen nichts aus. SEMENZA giebt in der erwähnten Abhandlung eine

31.
Graphische
Ermittlung
der wirtschaftlichen
Grössen.

1) Vgl. Fussnote 2 auf S. 15.

Reihe von Beispielen, die die verschiedenen Fälle der Energieverteilung behandeln. Hier sei zur Kennzeichnung dieser Methode die folgende interessante Aufgabe wiedergegeben:

Es sollen an einem Orte 4000 KW installiert werden, und zwar steht in einer gewissen Entfernung eine Wasserkraft zur Verfügung, die jedoch nur eine Leistung von 3000 KW bietet. Der Rest, also 1000 KW + Energieverlust in der Leitung, soll durch eine Dampfanlage, die natürlich am Orte der Verwendung aufzustellen ist, beschafft werden. Es ist der günstigste Leitungsverlust zu bestimmen.

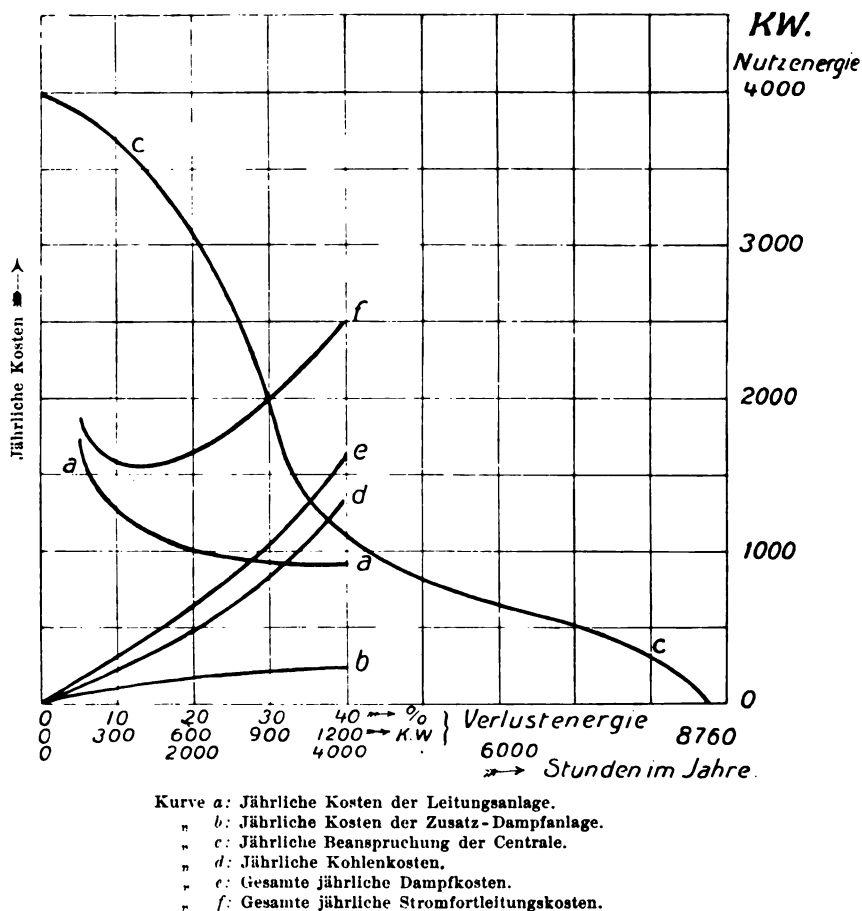


Fig. 16.

Die jährlichen Kosten der Anlage setzen sich zusammen aus den für die Amortisation der Kosten der Turbinenanlage, der Dampfanlage und der Leitungen aufzuwendenden Beträgen und den Kosten für Betrieb und Verwaltung. Da für die Ermittlung des wirtschaftlichen Energieverlustes nur die Kosten für denjenigen Teil der Dampfanlage in Frage kommen, der die Leistung von 1000 KW übersteigt, so können wir bei der Zeichnung der Kurven von vornherein die Kosten für die Turbine und für 1000 KW der Dampfanlage übergehen und brauchen nur die jährlichen Kosten für die Leitungs- und die überschüssige Dampfanlage — nennen wir sie kurz Zu-

und daher die Gesamtstromstärke zu

$$J = \sum i_v = \sum \frac{E}{w_v} = \frac{E}{W}$$

oder wenn wir statt der Widerstände die Leitfähigkeiten einführen,

$$J = \sum E g_v = E G$$

wo W und G den Gesamtwiderstand bzw. die Gesamtleitfähigkeit bezeichnen. Also der Gesamtwiderstand und die Gesamtleitfähigkeit n parallel geschalteter Widerstände ist

$$\frac{1}{W} = \sum_1^n \frac{1}{w_v} = G \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

$$G = \sum_1^n g_v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (23)$$

In Worten: Bei parallel geschalteten Widerständen addieren sich die Leitfähigkeiten und der Gesamtwiderstand ist gleich dem reziproken Wert der Gesamtleitfähigkeit.

Ferner ist:

$$i_1 : i_2 : \dots : i_n = g_1 : g_2 : \dots : g_n$$

also

$$i_v = \frac{g_v}{G} J = \frac{W}{w_v} J \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

Im besonderen wird der resultierende Widerstand für zwei parallel geschaltete Widerstände

$$W = \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

die Ströme in ihnen sind:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{g_1}{g_1 + g_2} J = \frac{w_2}{w_1 + w_2} J \\ i_2 &= \frac{g_2}{g_1 + g_2} J = \frac{w_1}{w_1 + w_2} J \end{aligned} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

Für n gleiche Widerstände w in Parallelschaltung wird

$$W = \frac{w}{n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

$$i = \frac{J}{n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

33. Gemischte Schaltung.

Bei der vorangehenden Entwicklung ist der Widerstand der die einzelnen Nutzwiderstände verbindenden Schienen als unendlich klein angenommen und daher nicht berücksichtigt worden. Ist dies nicht angängig, ist also der Widerstand der Zuleitungen gegenüber dem der parallel geschalteten Widerstände nicht zu vernachlässigen (Fig. 18), oder sind abwechselnd Widerstände und Gruppen hintereinander geschalteter Widerstände parallel geschaltet (Fig. 19), oder Widerstände oder Gruppen von parallel geschalteten Widerständen mit anderen derartigen Gruppen in Reihe geschaltet (Fig. 20), so entsteht die gemischte Schaltung.

Auch die gewöhnliche Anordnung räumlich verteilter Lampen oder sonstiger Nutzwiderstände in Parallelschaltung ist eine gemischte Schaltung,

da ja der Widerstand w der die Nutzwiderstände r verbindenden Leitungen stets einen angebbaren endlichen Wert besitzt. Fasst man den Begriff der gemischten Schaltung in diese strenge Definition, so ist leicht ersichtlich, dass reine Parallelschaltungsanlagen in der Praxis überhaupt nicht vorkommen, sondern nur gemischte Schaltungen. Man bezeichnet jedoch im weiteren Sinne als Parallelschaltungsanlagen alle diejenigen, in denen die Nutzwiderstände überwiegend einzeln zwischen die die Spannung führenden Leitungen geschaltet sind.

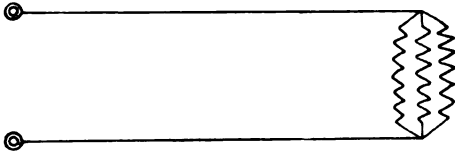


Fig. 18.

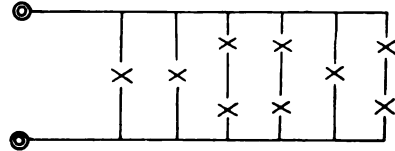


Fig. 19.

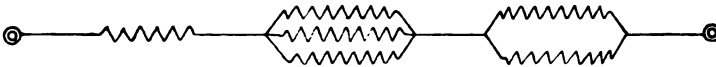


Fig. 20.

Da die Lösbarkeit eines grösseren oder kleineren Teils der Lampen unumgängliche Bedingung für jede Lichtanlage bildet, so steht bei der Berechnung von Leitungen die Forderung der Elastizität [5, 6] an erster Stelle. Die Spannungsschwankung darf also, konstante Maschinenspannung vorausgesetzt, bei Verminderung der Lampenzahl vom Maximum bis zum Minimum 3% der Nutzsprannung nicht überschreiten, wobei angenommen wird, dass nicht alle Lampen zugleich aus- oder eingeschaltet werden können, was ja durch Anordnung von Schaltern für entsprechend kleine Lampengruppen stets erreicht werden kann. Es soll also, falls E_0 die Betriebs-, E die Nutzsprannung bedeutet, $E_0 - E \leq 0.03 E$ sein, wobei wir statt $0.03 E$ auch ohne wesentlichen Fehler $0.03 E_0$ schreiben können. Nun ist aber $E_0 - E$ der Spannungsverlust 2ε in der Leitung; mit dieser Bedingung ist also bei elastischen Netzen, wie sie im folgenden stets vorausgesetzt werden, die obere Grenze für den zulässigen Spannungsverlust auf 3% der Nutzsprannung festgelegt, und wir dürfen diese Grenze selbst dann nicht überschreiten, wenn andere Rücksichten, wie die auf den wirtschaftlichen Betrieb, einen grösseren Verlust fordern würden. Vorausgesetzt ist hierbei allerdings, dass diese Spannungsverlustgrenze nicht, wie bei der Serienschaltung [11], auf unmögliche Ergebnisse in bezug auf den Wirkungsgrad führt. Dass dies nicht der Fall ist, lehrt die Aufstellung der Gleichung für diese Grösse. Der Wirkungsgrad der Leitung ist nach [12] Gleichung (5a)

$$\eta = \frac{E}{E_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}.$$

Die Grenzen für ε sind bei voller Belastung $\varepsilon = \frac{1}{2} (E_0 - E) = \varepsilon_0 - \varepsilon = 0.03 \varepsilon$ und bei unbelasteter oder sehr schwach belasteter Leitung $\varepsilon = 0$. Daher sind bei voller Elastizität die Grenzen für η die sehr günstigen Werte 0.97 und 1.0 im Gegensatz zur Reihenschaltung, wo unter den gleichen Verhältnissen η zwischen 0.03 und 0 liegt.

Mit der Bestimmung des maximalen Spannungsverlustes im Verhältnis zur Nutzspannung ist zugleich die absolute Grösse des ersteren festgelegt, da die Höhe der Nutzspannung für Beleuchtungsnetze durch diejenige Spannung gegeben ist, für welche Glühlampen hergestellt werden können. Die Grenze derselben liegt heute bei etwa 220 bis 250 Volt, doch haben sich frühzeitig, durch die Massenproduktion der Glühlampen bedingt, Normen für die Spannungen ausgebildet, die bei dem Bau der Netze auch heute noch eingehalten werden. Da früher Glühlampen von genügender Brenndauer für nicht mehr als 110 bis 120 Volt gebaut werden konnten, so wurde die Spannung von 110 Volt (in Dreileiternetzen 2×110 Volt) lange Zeit ausschliesslich als Nutzspannung verwandt, da sie zugleich für den Betrieb von Bogenlampen günstig war, die damals an ihren Klemmen etwa 45 Volt und zur Vermeidung grösserer Stromschwankungen einen Vorschaltwiderstand brauchten, der etwa 20 Volt verzehrte; sie konnten daher bei 110 Volt zu zweien hintereinander in den Stromkreis geschaltet werden. Als es später gelang, auch Glühlampen für 150 und 220 Volt zu bauen, entstanden Centralen auch für diese Spannungen, da ja bei höherem Spannungsverlust die Leitungen billiger werden, und zwar bildeten 220 Volt die am meisten angewandte zweite Norm, ohne dass jedoch deshalb die erste aufgegeben wurde, weil Glühlampen für 220 Volt denen für 110 Volt im spezifischen Energieverbrauch sowohl wie in der Lebensdauer nachstehen, und weil es ferner als Nachteil empfunden wurde, dass man stets vier Bogenlampen zugleich brennen musste, wollte man nicht den Energieverlust für die an dieser Zahl fehlenden in Kauf nehmen.

35.
Berechnung
der Strom-
verteilung.

Da die Stromstärke in den einzelnen Nutzwiderständen proportional zur Spannung ist, die an den Klemmen derselben herrscht, diese Spannung aber selbst wieder von der Stromstärke in der Leitung abhängt, insofern der Spannungsverlust proportional zum Strom ist, den die Leitung führt, so ist die genaue Stromverteilung selbst in einer einfachen Leitung mit parallel geschalteten Nutzwiderständen nur durch umständliche Rechnung zu gewinnen. Sehr einfach gestaltet sich jedoch die Bestimmung der Stromverteilung dann, wenn wir annehmen dürfen, dass an allen Punkten der Leitung die gleiche Spannung, nämlich die normale Nutzspannung herrscht. In diesem Falle können wir anstatt der Nutzwiderstände $2r$ unmittelbar die Stromstärken der Verbrauchsapparate $\sum \epsilon$ einsetzen und erhalten so bei offenen Leitungen unmittelbar die Stromverteilung durch Summierung der Abzweigströme. Diese Annahme kann aber nach dem Vorhergehenden bei elastischen Parallelschaltungsnetzen näherungsweise stets gemacht werden, da der Spannungsverlust in ihnen gegenüber der Nutzspannung vernachlässigt werden kann.

Den Einfluss des Fehlers, den wir bei diesem Näherungsverfahren in der Bestimmung der Stromstärke und damit in der Berechnung der Leitungsquerschnitte begehen, lehrt die folgende Überlegung: Hat die dem Anschlusspunkte zunächst liegende Lampe die normale Spannung und damit auch den normalen Strom, so erhält die letzte, entfernteste Lampe eine um höchstens 3% niedrigere Spannung und einen um ebensoviel geringeren Strom, während die zwischen beiden liegenden Lampen einen Strom verbrauchen, der weniger als 3% unterhalb des normalen Wertes liegt. Umgekehrt liegen die Verhältnisse, wenn die letzte Lampe normale Spannung, die erste also eine um

den Spannungsabfall zu hohe Spannung erhält. Der bei der Stromberechnung begangene Fehler wird aber stets weniger als 3% betragen und gleiches gilt für den auf Grund dieser Stromstärke berechneten Leitungsquerschnitt. Noch weiter kann der Fehler herabgedrückt werden, wenn man die Spannung am Anfang je nach der Belastung bis 1.5% über der normalen Nutzs-
pannung hält, so dass also die ersten Lampen um 1.5% zu viel, die letzten um ebensoviel zu wenig Strom erhalten. Ein so geringer Fehler kann aber ohne weiteres vernachlässigt werden, da ja einerseits die Unsicherheiten in den Annahmen der zu projektierenden Anlagen gewöhnlich bedeutend grösser sind, andererseits die Leitungsquerschnitte auf die gangbaren Stärken abgerundet werden müssen.

Die Hin- und Rückleitung von gleichem Querschnitt wird durch eine einfache Linie (Fig. 21) dargestellt, die mit fortlaufenden Zahlen versehenen Abzweigungen durch senkrechte Striche, denen die Abzweigströme (oder auch Lampen) i_n angefügt werden. Die Leitungsströme werden durch grosse Buchstaben mit Hinzufügung der Zahlen der Abzweigungen, zwischen denen sie fliessen, also mit $J_{\nu-1, \nu}$, die Längen zwischen den Abzweigungen durch

36.
Bezeich-
nungen.

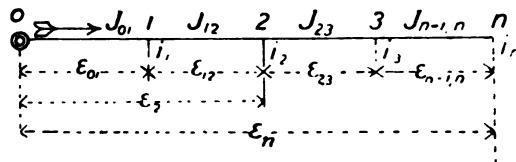


Fig. 21.

$l_{\mu \nu}$, die Spannungsverluste durch $\epsilon_{\mu \nu}$ u. s. w. bezeichnet, wobei die Ziffer 0 auch fortgelassen werden kann, so dass z. B. l_ν gleich $l_{0, \nu}$ wird. Zugleich bedeutet $J_{\mu \nu}$ den (positiven) Strom in der Richtung von μ nach ν , $\epsilon_{\mu \nu}$ den Spannungsabfall von μ nach ν , so dass also

$$\epsilon_{\mu \nu} = \epsilon_\mu - \epsilon_\nu = -\epsilon_{\nu \mu}; J_{\mu \nu} = -J_{\nu \mu}.$$

Unter der Länge (l), dem Widerstande (w), der „Spannung gegen Null“ (ϵ) und dem Spannungsverlust (ϵ) sind stets die entsprechenden Grössen der einfachen in Betracht gezogenen Leitung verstanden, also die Länge der Hin- oder Rückleitung allein (gleich der auf dem Plan gemessenen Länge) u. s. w.

Es ist, wie Fig. 21 unmittelbar zeigt:

37.
Spannungs-
verteilung.

$$l_\nu = \sum_1^\nu l_{\nu-1, \nu}$$

$$w_\nu = \sum_1^\nu w_{\nu-1, \nu}$$

$$\epsilon_\nu = \sum_1^\nu \epsilon_{\nu-1, \nu}$$

$$J_{\nu-1, \nu} = \sum_\nu^n i_\nu$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_1^n i_v w_v &= (i) w_n \\ \sum_1^n J_{v-1,v} w_{v-1,v} &= J_{01} (w) \\ \varepsilon &= (i) w_n = J_{01} (w) \end{aligned} \right\} \cdot \cdot \cdot \cdot (29)$$

so erhält man den Satz:

Der maximale Spannungsverlust ist dasjenige Moment, das der Summe der Strommomente das Gleichgewicht hält.¹⁾

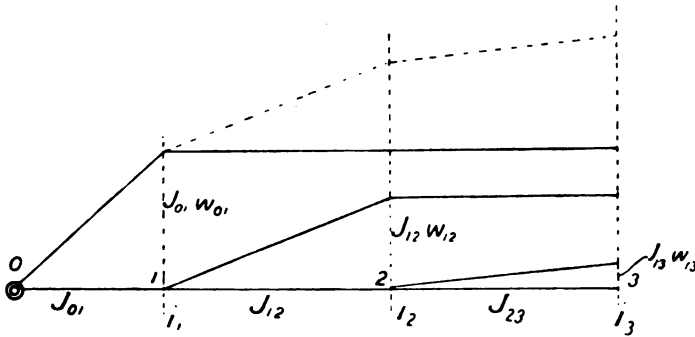


Fig. 24.

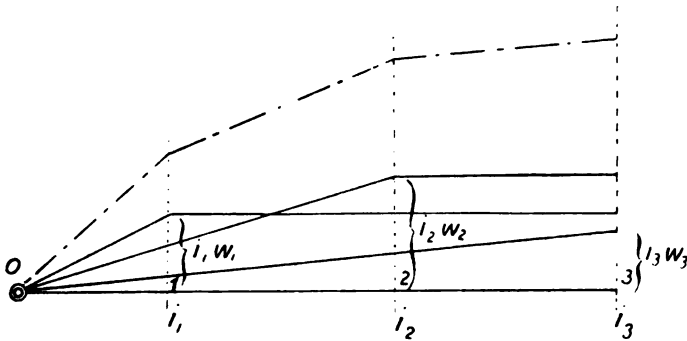


Fig. 25.

Da ferner das Strommoment $i_v w_v$ derjenige Spannungsverlust ist, den der Strom i_v in dem zu ihm gehörigen Gesamtwidestande w_v erzeugen würde, wenn er allein abgezweigt wäre, so können wir die Gleichung (III) auch folgendermassen aussprechen:

Der Gesamtspannungsverlust einer Leitung entsteht durch Superposition²⁾ der Spannungsverluste der einzelnen Abzweigströme.

Aus Gleichung (II) und (III) ergeben sich zwei einfache graphische Darstellungen des Spannungsverlustes in einer Leitung:

1) TEICHMÜLLER, Elektrische Leitungen.

2) Das Superpositionsgesetz der Wirkungen ist auf die Probleme der elektrischen Leitungsberechnung zuerst von J. TEICHMÜLLER (a. a. O.) in ausgedehnter und methodischer Weise in Anwendung gebracht worden.

Die Produkte $J_{r-1,v} w_{r-1,v}$ (Fig. 24) und $i_v w_v$ (Fig. 25) werden in entsprechendem Massstabe als Ordinaten an den betreffenden Abzweigstellen aufgetragen und ihre Endpunkte mit den Anfangspunkten der die w darstellenden Strecken verbunden. Jeder Strom bringt also seinen Spannungsverlust unabhängig von den andern Strömen hervor, und zwar steigt die ihn darstellende geneigte Gerade von Null bis zum Maximum auf, um dann bis ans Ende der Linie als Parallele zur Abscissenachse zu verlaufen. Die Einzelwirkungen summieren sich zum wahren Spannungsverlust und geben die strichpunktierte gebrochene Linie.

Sind also die Querschnitte bzw. die Teilwiderstände einer Leitung bekannt, so kann die Kontrolle des Spannungsverlustes ε nach den Gleichungen (IIa) bis (IIIa) bewerkstelligt werden. Anders dagegen, wenn bei gegebenem ε_n die Querschnitte der Leitung bestimmt werden sollen. Da die n Querschnitte verschieden sein können, so wären in der Gleichung (II) n Unbekannte vorhanden; es müssten also noch weitere $n - 1$ Gleichungen aufgestellt werden, die entweder die Bedingungen für das Verhältnis der Querschnitte zu einander oder das der Teilspannungsverluste $\varepsilon_{r-1,v}$ zu einander oder zum Gesamtspannungsverlust ε ausdrücken müssten. Eine willkürliche Wahl dieser Verhältnisse ist natürlich ausgeschlossen; es müssen vielmehr Gründe dafür massgebend gemacht werden, die sich aus dem Wesen der Leitungsberechnung ergeben, d. h. es müssen diejenigen Verhältnisse gewählt werden, die uns, sei es in ökonomischer, sei es in praktischer Hinsicht die günstigsten Querschnitte geben.

38.
Quer-
schnitts-
berechnung
auf Grund
des
geringsten
Kupfer-
gewichtes.

In ökonomischer Beziehung wird diejenige Leitung am günstigsten sein, die für den gegebenen maximalen Spannungsverlust ε das geringste Kupfergewicht bzw. Kupfervolumen besitzt. Dieses Kupfervolumen wird natürlich nicht das absolut günstigste Mass darstellen, das durch die Berechnung nach den in den Abschnitten [15] ff. gegebenen Gesichtspunkten erhalten werden könnte, da hiernach ja erst der günstigste Spannungsverlust ε_w zu bestimmen wäre, der im allgemeinen von unserm ε verschieden ausfallen würde. Da wir aber aus andern zwingenden Gründen [34] bereits über den maximalen Spannungsverlust verfügt haben, so wird das zu berechnende Minimum nur ein relatives sein können.

Das Volumen der Leitung ist durch $2 \sum_1^n l_{v-1,v} q_{v-1,v}$ bestimmt, wir erhalten also zu Gleichung (II) die weitere Bedingung:

$$V = 2 \sum_1^n l_{v-1,v} q_{v-1,v} = \text{Min.}$$

oder

$$\frac{\partial V}{\partial q_{v-1,v}} = 0 \quad (v = 1, 2 \dots n) \quad (30)$$

Aus diesen $n + 1$ Gleichungen würden wir durch Elimination eines q n voneinander unabhängige Gleichungen erhalten, die uns die gewünschten Lösungen ergeben würden.

Die Variable q ist nun zur Aufstellung der fehlenden $n - 1$ Gleichungen ungünstig, da der durch Elimination eines Querschnittes, z. B. $q_{n-1,n}$ sich ergebende Ausdruck recht kompliziert und daher zur Differentiation ungeeignet ist. Einfacher wird die Gestalt der Gleichungen, wenn wir anstatt der Teil-

querschnitte die Teilspannungsverluste als unabhängige Veränderliche einführen. Da

$$q_{v-1,v} = \frac{J_{v-1,v} l_{v-1,v}}{\varepsilon_{v-1,v}} \varrho$$

ist, so erhalten wir aus Gleichung (30):

$$V = 2 \varrho \sum_1^n \frac{l_{v-1,v}^2 J_{v-1,v}}{\varepsilon_{v-1,v}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

Ferner ist

$$\varepsilon_{n-1,n} = \varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{v-1,v},$$

also wird

$$\frac{V}{2\varrho} = \frac{J_{01} l_{01}^2}{\varepsilon_{01}} + \frac{J_{12} l_{12}^2}{\varepsilon_{12}} + \dots + \frac{J_{n-2,n-1} l_{n-2,n-1}^2}{\varepsilon_{n-2,n-1}} + \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{v-1,v}}$$

und durch partielle Differentiation nach $\varepsilon_{v-1,v}$ ($v = 1, 2 \dots n-1$):

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{01}} = -\frac{J_{01} l_{01}^2}{\varepsilon_{01}^2} + \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{(\varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{v-1,v})^2} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{12}} = -\frac{J_{12} l_{12}^2}{\varepsilon_{12}^2} + \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{(\varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{v-1,v})^2} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

.....

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{n-2,n-1}} = -\frac{J_{n-2,n-1} l_{n-2,n-1}^2}{\varepsilon_{n-2,n-1}^2} + \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{(\varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{v-1,v})^2} = 0.$$

Hieraus ergeben sich weiterhin die $n-1$ Gleichungen:

$$\frac{J_{01} l_{01}^2}{\varepsilon_{01}^2} = \frac{J_{12} l_{12}^2}{\varepsilon_{12}^2} = \dots = \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon_{n-1,n}^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

und da

$$\frac{J_{v-1,v}^2 l_{v-1,v}^2}{\varepsilon_{v-1,v}^2} \varrho^2 = q_{v-1,v}^2$$

oder

$$\frac{J_{v-1,v} l_{v-1,v}^2}{\varepsilon_{v-1,v}^2} = \frac{q_{v-1,v}^2}{J_{v-1,v}} \cdot \frac{1}{\varrho^2},$$

so folgt:

$$\frac{q_{01}^2}{J_{01}} = \frac{q_{12}^2}{J_{12}} = \dots = \frac{q_{n-1,n}^2}{J_{n-1,n}} = \text{Konst.}$$

d. h.

$$q_{v-1,v} = K \cdot \sqrt{J_{v-1,v}} \quad (v = 1, 2 \dots n) \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

In Worten: Soll bei bekannter Stromverteilung und gegebener Belastung eine Leitung für einen bestimmten maximalen Spannungsverlust die geringste Kupfermenge besitzen, so müssen die Querschnitte der einzelnen Strecken zwischen

den Abzweigungen proportional der Quadratwurzel aus der sie durchfliessenden Stromstärke gewählt werden.

Die Gleichungen (II) und (34) bilden also ein System von $n + 1$ unabhängigen Gleichungen für K und die n Querschnitte, die das Minimum an Leitungskupfer für das gewählte ε ergeben. Die Proportionalitätskonstante K eliminieren wir nun auf folgende Weise: Nach Gleichung (II) ist

$$\varepsilon = \varrho \left(\frac{J_{01} l_{01}}{q_{01}} + \frac{J_{12} l_{12}}{q_{12}} + \dots + \frac{J_{r-1,r} l_{r-1,r}}{q_{r-1,r}} + \dots + \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}}{q_{n-1,n}} \right)$$

oder, wenn wir alle Querschnitte $q_{01}, q_{12} \dots$ durch $q_{r-1,r}$ ausdrücken, indem

wir nach Gleichung (34) $\frac{1}{q_{\mu-1,\mu}} = \frac{\sqrt{J_{r-1,r}}}{\sqrt{J_{\mu-1,\mu}}} \cdot \frac{1}{q_{r-1,r}}$ setzen:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varrho \frac{\sqrt{J_{r-1,r}}}{q_{r-1,r}} (\sqrt{J_{01}} l_{01} + \sqrt{J_{12}} l_{12} + \dots + \sqrt{J_{r-1,r}} l_{r-1,r} + \dots \\ &\quad + \sqrt{J_{n-1,n}} l_{n-1,n}) \\ &= \varrho \frac{\sqrt{J_{r-1,r}}}{q_{r-1,r}} \sum_1^n l_{r-1,r} \sqrt{J_{r-1,r}} \end{aligned}$$

woraus

$$K = \frac{q_{r-1,r}}{\sqrt{J_{r-1,r}}} = \frac{\varrho}{\varepsilon} \sum_1^n l_{r-1,r} \sqrt{J_{r-1,r}} \quad (35)$$

folgt. Die endgültigen n Gleichungen für die n Querschnitte lauten also:

$$q_{r-1,r} = \left(\frac{\varrho}{\varepsilon} \sum_1^n l_{r-1,r} \sqrt{J_{r-1,r}} \right) \cdot \sqrt{J_{r-1,r}} \quad (\nu = 1, 2 \dots n) \quad (IV)$$

Das Kupferminimum selbst ergibt sich schliesslich zu

$$V_{min} = 2 \sum_1^n q_{r-1,r} l_{r-1,r} = \frac{2\varrho}{\varepsilon} \left(\sum_1^n l_{r-1,r} \sqrt{J_{r-1,r}} \right)^2 \quad (V)$$

Es bleibt nun noch zu zeigen, dass die mit Hilfe der Gleichungen (IV) berechneten Querschnitte ein Minimum des Kupfervolumens ergeben, nicht etwa ein Maximum. Das erstere ist nach den Regeln der höheren Analysis der Fall, wenn die folgenden Ungleichungen¹⁾ erfüllt sind:

$$\begin{aligned} A_1 &\equiv \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}^2} > 0. \\ A_2 &\equiv \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01} \partial \varepsilon_{12}} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12} \partial \varepsilon_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12}^2} \end{vmatrix} > 0. \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

1) S. SCHLÖMILCH, Handbuch der Mathematik II, S. 509.

$$J_n \equiv \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01} \partial \varepsilon_{12}} & \cdots & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01} \partial \varepsilon_{n-1,n}} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12} \partial \varepsilon_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12}^2} & \cdots & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12} \partial \varepsilon_{n-1,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{n-1,n} \partial \varepsilon_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{n-1,n} \partial \varepsilon_{12}} & \cdots & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{n-1,n}^2} \end{vmatrix} > 0.$$

Es genügt, wenn wir an den ersten zwei Ungleichungen deren Gültigkeit nachweisen, da für die übrigen der Nachweis in ganz ähnlicher Weise durch Zurückführung der Determinanten höherer in solche niederer Ordnung geführt werden kann.

Aus den Gleichungen (32):

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{01}} = - \frac{J_{01} l_{01}^2}{\varepsilon_{01}^3} + \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{(\varepsilon - \sum_1 \varepsilon_{v-1,v})^2} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{12}} = - \frac{J_{12} l_{12}^2}{\varepsilon_{12}^3} + \frac{J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{(\varepsilon - \sum_1 \varepsilon_{v-1,v})^2} = 0$$

ergibt sich:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}^2} = \frac{2 J_{01} l_{01}^2}{\varepsilon_{01}^3} + \frac{2 J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{(\varepsilon - \sum_1 \varepsilon_{v-1,v})^3} = \frac{2 J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon_{n-1,n}^3} \left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right),$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12}^2} = \frac{2 J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon_{n-1,n}^3} \left(\frac{1}{\varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right),$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01} \partial \varepsilon_{12}} = \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12} \partial \varepsilon_{01}} = \frac{2 J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon_{n-1,n}^3}.$$

Da nun sämtliche in

$$A_1 = \frac{2 J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon_{n-1,n}^3} \left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right)$$

vorkommenden Größen wesentlich positiv sind, so folgt ohne weiteres

$$A_1 > 0.$$

Ferner wird auch

$$A_2 = \left(\frac{2 J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon_{n-1,n}^3} \right)^2 \left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right) - \left(\frac{2 J_{n-1,n} l_{n-1,n}^2}{\varepsilon_{n-1,n}^3} \right)^2 \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}^3} > 0,$$

da ja

$$\left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right) - \left(\frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \right)^2 = \frac{1}{\varepsilon_{01} \varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{12}} \right)$$

ebenfalls aus lauter positiven Größen besteht. —

Wir haben bisher die Hin- und Rückleitung unseres Leitungsstranges von gleichem Querschnitt angenommen. Es fragt sich, ob diese Annahme die günstigste Anordnung ist, oder ob ein anderes Verhältnis der Querschnitte eine geringere Kupfermenge ergeben würde.

Bezeichnen wir den Querschnitt der Hinleitung mit q_h , den der Rückleitung mit q_r und entsprechend die Spannungsverluste in ihnen mit ε_h und ε_r , so ist zunächst

$$\varepsilon_h + \varepsilon_r = 2\varepsilon.$$

Das Kupfervolumen ist

$$V = l(q_h + q_r) = J l^2 \varrho \left(\frac{1}{\varepsilon_h} + \frac{1}{\varepsilon_r} \right) = J l^2 \varrho \left(\frac{1}{\varepsilon_h} + \frac{1}{2\varepsilon - \varepsilon_h} \right).$$

Hieraus erhalten wir weiter:

$$\frac{dV}{d\varepsilon_h} = -\frac{1}{\varepsilon_h^2} + \frac{1}{(2\varepsilon - \varepsilon_h)^2} = 0$$

oder

$$\varepsilon_h = \varepsilon_r = \varepsilon,$$

d. h.

$$q_h = q_r.$$

Das Minimum der Kupfermenge wird erhalten, wenn die Hin- und Rückleitung einer Linie von gleichem Querschnitt sind.

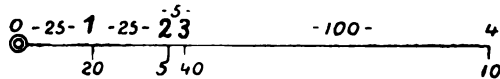


Fig. 26.

Beispiel. Es sei eine Leitung nach Fig. 26 auf geringste Kupfermenge zu berechnen, wenn die Nutzspannung 120 Volt beträgt und ein maximaler Verlust von 2% zugelassen wird.

Wir haben also

$$2\varepsilon = 2\cdot4; \quad J_{01} = \sum_1^4 i_r = 75; \quad J_{12} = \sum_2^4 i_r = 55; \quad J_{23} = \sum_3^4 i_r = 50;$$

$$J_{34} = i_4 = 10.$$

Ferner

$$\varrho = 0\cdot018 \text{ (Kupferleitung).}$$

Demnach wird nach Gleichung (35):

$$K = \frac{\varrho}{\varepsilon} \sum_1^4 l_{r-1,r} J_{r-1,r} = \frac{0\cdot018}{1\cdot2} \cdot 754 = 11\cdot3$$

und nach Gleichung (34):

$$q_{01} = 11\cdot3 \sqrt[4]{75} = 98 \text{ mm}^2 \quad \text{und} \quad \varepsilon_{01} = \frac{75 \cdot 25 \cdot 0\cdot018}{98} = 0\cdot345$$

$$q_{12} = 11\cdot3 \sqrt[4]{55} = 83 \quad \text{''} \quad \varepsilon_{12} = \frac{55 \cdot 25 \cdot 0\cdot018}{83} = 0\cdot297$$

$$q_{23} = 11\cdot3 \sqrt[4]{50} = 80 \quad \text{''} \quad \varepsilon_{23} = \frac{50 \cdot 5 \cdot 0\cdot018}{80} = 0\cdot056$$

$$q_{34} = 11\cdot3 \sqrt[4]{10} = 35\cdot8 \quad \text{''} \quad \varepsilon_{34} = \frac{10 \cdot 100 \cdot 0\cdot018}{35\cdot8} = 0\cdot502$$

$$\varepsilon = 1\cdot200.$$

Das aufgewendete Kupfervolumen beträgt

$$V_{\min} = 2 (25 \cdot 98 + 25 \cdot 83 + 5 \cdot 80 + 100 \cdot 35 \cdot 8) = 17000 \text{ cm}^3.$$

Dass die so erhaltenen Querschnitte auch der Feuersicherheit genügen, zeigt die Tabelle I, S. 6. Zugleich ersieht man aus ihr aber auch, dass von diesen Querschnitten keiner den fabrikmässig hergestellten Normalquerschnitten entspricht. Der erste und letzte Querschnitt können ohne weiteres durch die fast gleichen Normalquerschnitte 95 und 35, die beiden andern müssen durch die nächstliegenden Querschnitte 95 und 70 mm² ersetzt werden und es ergibt sich dann:

$$\varepsilon = 1.19; \quad V = 17200.$$

Also durch die Änderung der Querschnitte ist die Kupfermenge etwas grösser, der Spannungsverlust unwesentlich kleiner geworden.

Es zeigt sich also, dass im allgemeinen in der Praxis die genaue Ausführung der auf minimale Kupfermenge berechneten Leitungen nicht durchführbar ist, dass man sich dem günstigsten Fall nur nähern kann. Ein fernerer Übelstand, der zugleich das mit dem geringsten Kupfervolumen selbstverständlich erstrebte Kostenminimum illusorisch macht, ist der häufige Wechsel der Kabelquerschnitte, wodurch Lötungen und Verbindungsstücke notwendig werden, die die Leitungskosten natürlich erhöhen.

Diese Übelstände werden vermieden, wenn wir für die ganze Strecke den gleichen Querschnitt, also

$$q_{01} = q_{12} = \dots = q_{n-1,n} = q$$

voraussetzen. Dies ergibt die in praktischer Hinsicht günstigste Anordnung der Leitungen, bildet also die zweite der oben erwähnten Grundlagen für die Querschnittsberechnung.

Die Gleichung (II)

$$\varepsilon = \rho \sum_1^n \frac{J_{v-1,v} l_{v-1,v}}{q_{v-1,v}}$$

vereinfacht sich dann zu

$$\varepsilon = \frac{\rho}{q} \sum_1^n J_{v-1,v} l_{v-1,v}, \quad \dots \dots \dots \quad (\text{VI})$$

also wird

$$q = \frac{\rho}{\varepsilon} \sum_1^n J_{v-1,v} l_{v-1,v} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{VII})$$

oder auch, da nach (II) und (III)

$$\sum_1^n J_{v-1,v} w_{v-1,v} = \sum_1^n i_v w_v, \quad \text{d. h.} \quad \sum_1^n J_{v-1,v} l_{v-1,v} = \sum_1^n i_v l_v:$$

$$q = \frac{\rho}{\varepsilon} \sum_1^n i_v l_v \quad \dots \dots \dots \quad (\text{VIII})$$

Legen wir wieder die Daten unseres Beispiels auf S. 42 zu Grunde, so wird nach Gleichung (VII):

39.
Quer-
schnitts-
berechnung
bei
konstantem
Querschnitt.

Beispiel.

$$\begin{array}{r}
 \sum_1^n J_{r-1,r} l_{r-1,r} = 75 \cdot 25 = 1875 \\
 \quad \quad \quad + 55 \cdot 25 = 1375 \\
 \quad \quad \quad + 50 \cdot 5 = 250 \\
 \quad \quad \quad + 10 \cdot 100 = 1000 \\
 \hline
 \quad \quad \quad 4500
 \end{array}$$

und nach Gleichung (VIII):

$$\begin{array}{r}
 \sum_1^n i_r l_r = 20 \cdot 25 = 500 \\
 \quad \quad \quad + 5 \cdot 50 = 250 \\
 \quad \quad \quad + 40 \cdot 55 = 2200 \\
 \quad \quad \quad + 10 \cdot 155 = 1550 \\
 \hline
 \quad \quad \quad 4500
 \end{array}$$

Wir erhalten also:

$$q = \frac{0.018}{1.2} \cdot 4500 = 67.5 \text{ mm}^2 \doteq 70 \text{ mm}^2,$$

einen Querschnitt, der der Feuersicherheit Genüge leistet. Das Kupfervolumen wird

$$V = 2 \cdot 67.5 \cdot 155 = 20925 \text{ cm}^3 \text{ gegen } V_{\min} = 17000 \text{ cm}^3, \\ \text{bzw.}$$

$$V = 2 \cdot 70.0 \cdot 155 = 21700 \text{ „ „ } V_{\min} = 17200 \text{ „ „}$$

also etwa 25% grösser als dem günstigsten Falle entspricht.

40.
Quer-
schnitts-
berechnung
bei
konstanter
Strom-
dichte.

Giebt also die letzte Methode auch grössere Kupfermengen als die Berechnung auf die ökonomisch günstigsten Querschnitte, so wird man doch meist wegen der damit verbundenen Bequemlichkeit der Leitungsverlegung die Berechnung auf konstanten Querschnitt vorziehen und auch bei grösseren Netzen mit einigen wenigen Querschnitten auszukommen suchen, da ja, wie schon erwähnt, die Kosten des Netzes nicht allein von der Kupfermenge abhängen, sondern auch von den bei Querschnittsänderungen nötigen Verbindungsteilen, von den für die Lötstellen aufzuwendenden Arbeitslöhnen, vom Verschnitt u. s. w. Ferner ist eine feste und unveränderliche Belastung von Netzen, für die ja die Rechnung allein gilt, fast niemals gegeben, sie ändert sich vielmehr fortwährend; daher hat die Berechnung auf das Minimum des Leitungsmetall nur einen relativen, vergleichenden Wert: man will sich nicht zu weit von dem günstigsten Kupferaufwande entfernen. Andererseits kann es leicht vorkommen, dass der berechnete konstante Querschnitt für die in dem ersten Teil der Strecke fliessende Gesamtstromstärke nicht die nötige Feuersicherheit bietet, so dass aus diesem Grunde, will man nicht den Querschnitt für die ganze Strecke verstärken, verschiedene Querschnitte verwendet werden müssen. Für den Fall, dass verschiedene Querschnitte erwünscht sind, giebt die Berechnung auf konstante Stromdichte eine brauchbare und bequeme Methode ab.

Ersetzt man nämlich in Gleichung (II)

$$\varepsilon = q \sum_1^n \frac{J_{r-1,r} l_{r-1,r}}{q_{r-1,r}}$$

Die beiden Methoden der Querschnittsberechnung auf konstanten Querschnitt und konstante Stromdichte geben demnach die gleichen Kupfermengen, die aber nicht das geringste Kupfervolumen darstellen.

Beispiel. Nach S. 42 war: $\varepsilon = 1.2$; $J_{01} = 75$; $J_{12} = 55$; $J_{23} = 50$; $J_{34} = 10$; $l_{01} = 25$; $l_{12} = 25$; $l_{23} = 5$; $l_{34} = 100$. Also wird nach Gleichung (IX) und (X):

$$j = \frac{\varepsilon}{\rho l_n} = \frac{1.2}{0.018 \cdot 155} = 0.430 \text{ Amp./mm}^2$$

$$q_{01} = \frac{75}{0.430} = 174; q_{12} = 128; q_{23} = 116; q_{34} = 23.2 \text{ mm}^2.$$

Bei dem auf S. 44 ermittelten, für die ganze Länge konstanten Querschnitt 67.5 mm^2 betrug dagegen die Stromdichte im ersten Teil des Kabels 1.11 , im letzten nur 0.148 Amp./mm^2 , d. h. 7.5 mal weniger.

41. In der Praxis kommt öfter der Fall vor, dass, etwa wie bei dem Beispiel der öffentlichen Beleuchtung in Reihenschaltung auf S. 9, eine Leitung in gleichen Abständen durch die gleiche Stromabnahme, oder auch, dass sie im Grenzfalle ihrer ganzen Länge nach gleichförmig belastet ist, so dass sie also auf jedes Längenelement dl den gleichen Strom di abzugeben hat. Der letzte Fall gewinnt einmal Bedeutung bei der Isolationsberechnung von Kabeln,

Besondere Fälle der Stromverteilung.

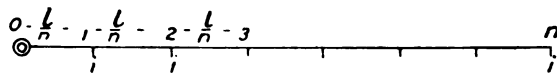


Fig. 27.

wenn sie nämlich in ihrer ganzen Länge gleichmässig gut oder schlecht isoliert sind, ferner aber bei der Projektierung von Beleuchtungscentralen, wenn man mangels sicherer Angaben gezwungen ist, nach Massgabe ähnlicher Anlagen eine Belastung von i Amp. für 1 m Strassenfront anzunehmen. Wir wollen nun die Gleichungen für die Spannungsverteilung und Querschnittsberechnung bei einer derartigen Stromverteilung in Parallelschaltung ermitteln, wenn die Leitung konstanten Querschnitt besitzt.

Ist also eine Leitung von $l \text{ m}$ einfacher Länge auf je $\frac{l}{n} \text{ m}$ mit einer Stromabnahme von i Amp. belastet (Fig. 27), und ist 2ε der maximal zulässige Spannungsverlust, so wird der zuzuführende Gesamtstrom

$$J = ni,$$

und die Teilströme in den Teilstrecken der Leitung sind:

$$J_{\nu-1, \nu} = [n - (\nu - 1)] i.$$

Daher wird nach Gleichung (VII):

$$q = \frac{\rho}{\varepsilon} \sum_1^n J_{\nu-1, \nu} l_{\nu-1, \nu} = \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{li}{n} \sum_1^n [n - (\nu - 1)]$$

oder entwickelt:

$$\begin{aligned} q &= \frac{\rho}{\varepsilon} \cdot \frac{li}{n} [n + (n-1) + \dots + (n - (\nu-1)) + \dots + 2 + 1] \\ &= \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{li}{n} \frac{n(n+1)}{2} \\ &= \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{\rho}{\varepsilon} \cdot lJ \dots \dots \dots (40) \end{aligned}$$

Umgekehrt würde bei bekanntem Querschnitt der Spannungsverlust am Ende der Leitung sein:

$$\varepsilon = \frac{n+1}{2n} \varrho \frac{lJ}{q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

und der Spannungsverlust in irgend einem Abzweigpunkte ν :

$$\begin{aligned} \varepsilon_\nu &= \frac{\varrho li}{qn} [n + (n-1) + \dots + (n - (\nu-1))] \\ &= \frac{\nu}{n} \left(1 - \frac{\nu-1}{2n}\right) \varrho \frac{lJ}{q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (42) \end{aligned}$$

Für $n = \infty$ erhalten wir den Grenzfall der gleichförmig belasteten Leitung, die für jedes Längenelement dl den Strom di abgibt, so dass $\int_0^l di = \frac{J}{l} \int_0^l dl = J$ ist. Für diesen Fall wird:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \varrho \frac{lJ}{q}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XI)$$

da

$$\left[\frac{n+1}{2n} \right]_{n=\infty} = \left[\frac{1 + \frac{1}{n}}{2} \right]_{n=\infty} = \frac{1}{2}$$

ist, und:

$$q = \frac{1}{2} \frac{\varrho}{\varepsilon} \cdot lJ \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XII)$$

Das heisst also: Eine gleichförmig belastete Leitung mit der Gesamtstromentnahme J verhält sich genau wie eine mit der halben Stromstärke am Ende oder mit der Gesamtstromstärke in der Mitte

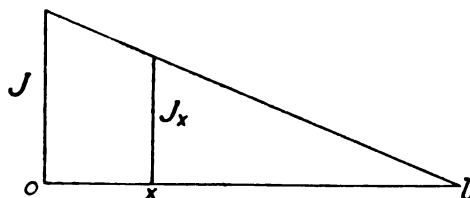


Fig. 28.

belastete Leitung. Wir haben uns demnach in dem oben erwähnten praktischen Falle, dass die Stromentnahme einer Leitung mit i Amp. für das laufende Meter gegeben ist, dieselbe in der Mitte mit $J = il$ Amp. belastet zu denken.

Wollen wir den Spannungsverlust in irgend einem Punkte der gleichförmig belasteten Leitung bestimmen, so gilt die folgende Überlegung: Der Leitungsstrom in der Entfernung x vom Anfangspunkt beträgt

$$J_x = J - \frac{J}{l} x = \frac{J}{l} (l - x) \text{ Amp.}$$

Die Belastung wird also durch eine Gerade (Fig. 28) dargestellt, die durch den Endpunkt der Leitung geht ($J_x = 0$ für $x = l$) und von der Ordinatenachse eine Strecke gleich J abschneidet ($J_x = J$ für $x = 0$). Der Spannungsverlust im Längenelement dx ist also:

$$d\varepsilon = \varrho \cdot \frac{J_x dx}{q}$$

und der Spannungsverlust bis zum Punkte x :

$$\varepsilon_x = \frac{\rho}{q} \int_0^x J_x dx = \frac{\rho}{q} \frac{J}{l} \int_0^x (l-x) dx$$

$$\varepsilon_x = \frac{\rho}{q} \frac{Jx}{l} \left(l - \frac{x}{2} \right) \quad \dots \quad \text{(XIa)}$$

Für $x = l$ erhalten wir wieder den maximalen Spannungsverlust wie in Gleichung (XI).

Die Gleichung (XIa) stellt eine Parabel dar, deren Scheitel über dem Endpunkte der Strecke $x = l$ liegt und daher zur Ordinate den Spannungsverlust $\varepsilon = \frac{1}{2} \rho \frac{lJ}{q}$ hat.

Dagegen erhalten wir für $n = 1$ aus den Gleichungen (40) und (41) den bereits bekannten Fall der nur mit einer Stromentnahme $i = J$ am Ende belasteten Strecke, für welche der maximale Spannungsverlust

$$\varepsilon_1 = \rho \frac{lJ}{q} = 2\varepsilon$$

wird. Ähnlich ergibt sich für $n = 2, 4, 8 \dots$

$$\varepsilon_2 = \frac{3}{4} \rho \frac{lJ}{q} = 1.5\varepsilon$$

$$\varepsilon_4 = 1.25\varepsilon$$

$$\varepsilon_8 = 1.125\varepsilon$$

u. s. f. Diese Spannungsverlustkurven sind in Fig. 29 dargestellt. Da $\varepsilon_1 = 2\varepsilon$, so ist die Gerade $0\varepsilon_1$ Tangente der Parabel im Punkte 0. Die Spannungs-

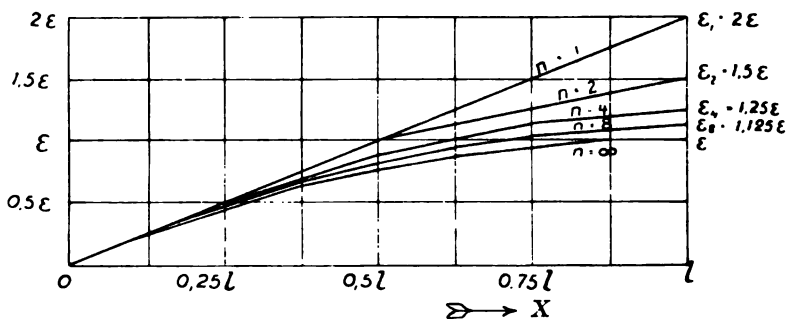


Fig. 29.

verlustkurven nähern sich mit wachsendem n der Parabel, und zwar kann man, wie ersichtlich, bereits für verhältnismässig kleine n die einfacheren Grenzformeln (XI), (XIa) und (XII) zur Rechnung verwenden, ohne wesentliche Fehler zu begehen.

Umgekehrt ist aus den Kurven der Fig. 29 zu ersehen, dass es statthaft ist, die Belastung einer Strecke mangels genauer Angaben für das laufende Meter anzunehmen. Im äussersten Falle, nämlich wenn die ganze Last am Ende der Leitung abgenommen wird, würde der Verlust doppelt soviel als angenommen betragen. Im allgemeinen wird dieser Fall jedoch nie eintreten, da Punkte mit grösserer Belastung (Theater u. s. f.) bekannt zu sein pflegen

und gesondert neben der gleichförmigen Belastung berücksichtigt werden. Die Verteilung für die letztere wird sich vielmehr stets so gestalten, dass eine grössere Zahl von Abzweigungen vorhanden ist, die die Voraussetzung einer gleichförmigen Belastung zu rechtfertigen geeignet ist.

Die bisher betrachteten offenen Leitungen stellten sich als einfache Strecken dar, von denen die räumlich verteilten Belastungen unmittelbar abgenommen wurden. Liegen diese Abzweigungen, wie in Fig. 30 angedeutet, zerstreut, so entsteht durch Verbindung derselben eine verzweigte Leitung, bei der man im allgemeinen je nach der Grösse der Belastungen Haupt- und Nebenzweige unterscheiden kann. Auch hier gilt die Hauptforderung, dass der Spannungsverlust an keinem Punkte der Leitung eine gegebene Grösse ε überschreiten darf, und man kann von vornherein sagen, dass die günstigste Ausnutzung des Kupfers erreicht werden wird, wenn bei voller Belastung der maximal zulässige Spannungsverlust an allen freien Enden erreicht wird. In diesem Falle kann man aber die zu jedem Verzweigungspunkt gehörigen,

42.
Querschnitts-
berechnung
bei
verzweigten
Leitungen.

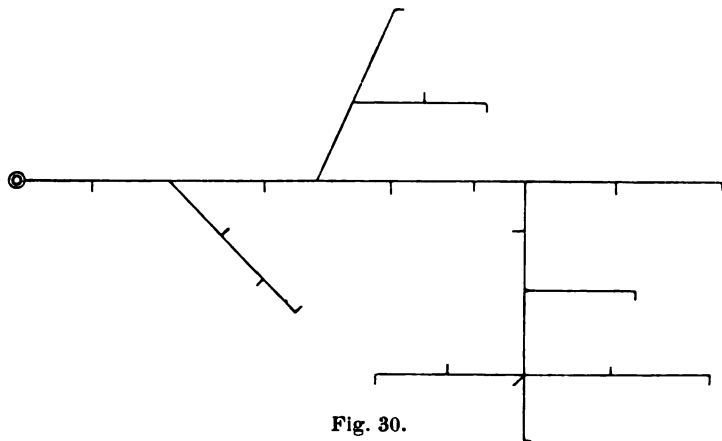


Fig. 30.

parallel geschalteten Leitungen durch eine solche von äquivalenter Leitfähigkeit ersetzen, deren Länge und Querschnitt allerdings vorerst noch unbestimmt sind, und gelangt so, von dem letzten Verzweigungspunkt rückwärts gehend, zu einem einfachen Leitungsstrang.

Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall, nämlich eine Leitung (Fig. 31), die sich in zwei Zweige gabelt. Die Leitungsströme J_{01} , J'_{12} und J''_{12} können ohne weiteres aus den Belastungen abgeleitet werden und es ist

43.
Geringstes
Kupfer-
gewicht bei
verzweigten
Leitungen.

$$\varepsilon = \varepsilon_{01} + \varepsilon_{12},$$

also wird:

$$q_{01} = \frac{J_{01} l_{01}}{\varepsilon_{01}} q; \quad q'_{12} = \frac{J'_{12} l'_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}} q; \quad q''_{12} = \frac{J''_{12} l''_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}} q. \quad (43)$$

Da diese drei Gleichungen vier Unbekannte enthalten, nämlich q_{01} , q'_{12} , q''_{12} und ε_{01} , so müssen wir, um die Lösungen eindeutig zu gestalten, noch eine vierte Gleichung hinzufügen, und hierzu werden wir, wie früher, zunächst natürlich die Bedingung des geringsten Kupfervolumens wählen. Wir erhalten also als vierte Gleichung:

$$\frac{1}{2} V = q_{01} l_{01} + q'_{12} l'_{12} + q''_{12} l''_{12} = \text{Min.}$$

oder indem wir die Querschnitte eliminieren:

$$\frac{V}{2q} = \frac{J_{01} l_{01}^2}{\epsilon_{01}} + \frac{J'_{12} l'^2_{12}}{\epsilon - \epsilon_{01}} + \frac{J''_{12} l''^2_{12}}{\epsilon - \epsilon_{01}} = \text{Min.} \quad (44)$$

Die Differentiation nach ϵ_{01} ergibt als günstigstes Verhältnis der Teilspannungsverluste:

$$\frac{J_{01} l_{01}^2}{\epsilon_{01}^2} = \frac{J'_{12} l'^2_{12} + J''_{12} l''^2_{12}}{\epsilon_{12}^2}$$

oder:

$$\frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{12}} = \frac{l_{01}}{\sqrt{\frac{J'_{12} l'^2_{12}}{J_{01}} + \frac{J''_{12} l''^2_{12}}{J_{01}}}} \quad (45a)$$

Die Wurzelgrösse

$$\sqrt{\frac{J'_{12} l'^2_{12}}{J_{01}} + \frac{J''_{12} l''^2_{12}}{J_{01}}} = \lambda_{12} \quad (46a)$$

stellt offenbar eine Länge dar; sie wird nach dem Vorgange von HERZOG-FELDMANN¹⁾ die „fiktive Länge der quadratischen Strommomente“ der beiden Zweigleitungen, kurz die „fiktive Länge“ der die beiden Zweigleitungen ersetzenden Strecke λ_{12} (Fig. 31) genannt, da sie diejenige Länge darstellt, in der der Gesamtstrom $J_{12} = J'_{12} + J''_{12} = J_{01}$ den Spannungsverlust ϵ_{12} hervorbringen würde, wie leicht ersichtlich ist, wenn wir Gleichung (45a) in der Form schreiben:

$$\frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{12}} = \frac{l_{01} J_{01} q/q_{01}}{\lambda_{12} J_{12} q/q_{01}}$$

Der Querschnitt dieser fiktiven Leitung würde dann gleich demjenigen der unverzweigten Leitung q_{01} sein. Durch diese Annahmen sind also Länge und Querschnitt der die Einzelleitungen ersetzenden äquivalenten Leitfähigkeit für den Fall des geringsten Kupfervolumens festgelegt.

Setzen wir anstatt der zwei Zweigleitungen allgemeiner n solcher Leitungen voraus, so geht Gleichung (45a) in die folgende über:

$$\frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{12}} = \frac{l_{01}}{\sqrt{\frac{1}{J_{01}} \sum_1^n \left(l_{12}^{(r)} \sqrt{J_{12}^{(r)}} \right)^2}} = \frac{l_{01}}{\lambda_{12}} \quad (45)$$

wo dann

$$\lambda_{12} = \sqrt{\frac{1}{J_{01}} \sum_1^n \left(l_{12}^{(r)} \sqrt{J_{12}^{(r)}} \right)^2} \quad (46)$$

Die Querschnitte ergeben sich schliesslich mittels der Gleichungen (43).

Sind die Leitungen nicht bloss an den Enden belastet (Fig. 32), so berechnet man die einzelnen Teilquerschnitte nach Massgabe des Abschnittes [38], nachdem gemäss Gleichung (45) die Teilspannungen für den unverzweigten und verzweigten Teil der ganzen Strecke bestimmt sind. Zu diesem Zwecke müssen wir allerdings noch eine kleine Umformung der Gleichung (35) vornehmen, da die Gleichung (45) in den unverzweigten Leitungsteilen

1) Elektrische Leitungsnetze, 1. u. 2. Aufl.

nur eine die ganze Länge durchfließende Stromstärke voraussetzt. Nach Gleichung (35) ist:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{K} \sum_1^n l_{v-1,v} \sqrt{J_{v-1,v}}$$

oder, wenn wir die rechte Seite mit der ganzen Länge l_n multiplizieren und dividieren:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{K} l_n \sum_1^n \frac{l_{v-1,v}}{l_n} \sqrt{J_{v-1,v}} = \frac{\rho}{K} l_n \sqrt{J_n} \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

indem wir für die Summe der im Verhältnis $\frac{l_{v-1,v}}{l_n}$ reduzierten Wurzeln aus den Leitungsströmen $\sqrt{J_n}$ setzen. J_n ist dann diejenige Stromstärke, welche,

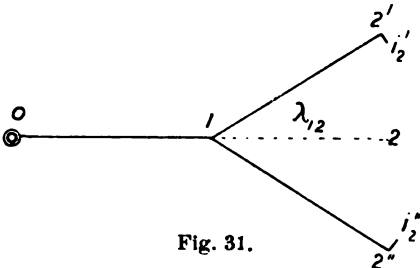


Fig. 31.

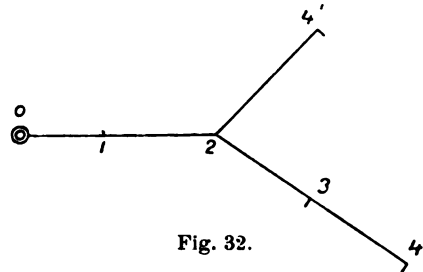


Fig. 32.

die ganze Leitung durchfließend, den gleichen Spannungsverlust ε hervorruft, der durch die tatsächliche Stromverteilung entsteht, da $K = \frac{q_n}{\sqrt{J_n}}$ in Gleichung (47) eingesetzt

$$\varepsilon = \rho \frac{l J_n}{q_n}$$

ergibt. Wir nennen daher in Anlehnung an die oben definierte „fiktive Länge“ J_n die „fiktive Stromstärke“ der Leitung, und es ist

$$\sqrt{J_n} = \frac{1}{l_n} \sum_1^n l_{v-1,v} \sqrt{J_{v-1,v}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

Demnach würde für Fig. 32 sein:

$$\sqrt{J_{02}} = \frac{1}{l_{02}} (l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}})$$

$$\sqrt{J_{24}} = \frac{1}{l_{24}} (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})$$

$$\begin{aligned} \lambda_{24} &= \frac{1}{\sqrt{J_{02}}} \sqrt{(l_{24} \sqrt{J_{24}})^2 + (l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2} \\ &= \frac{l_{02} \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2}}{l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{02} = \frac{l_{02}}{l_{02} + \lambda_{24}} \varepsilon$$

$$= \frac{l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}}{l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}} + \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2}} \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon_{24} = \frac{\lambda_{24}}{l_{02} + \lambda_{24}} \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_{02}$$

Daher ergeben sich nach Gleichung (IV) für die einzelnen Querschnitte die folgenden expliziten Ausdrücke:¹⁾

$$\begin{aligned}
 q_{01} &= \frac{q}{\epsilon_{02}} (l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}) \sqrt{J_{01}} \\
 &= \frac{q}{\epsilon} \sqrt{J_{01}} [l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}} + \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2}] \\
 q_{12} &= \frac{q}{\epsilon_{03}} (l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}) \sqrt{J_{12}} \\
 &= \frac{q}{\epsilon} \sqrt{J_{12}} [l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}} + \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2}] \\
 q'_{24} &= \frac{q}{\epsilon_{24}} l'_{24} J'_{24} = \frac{q}{\epsilon_{24}} \sqrt{J'_{24}} (l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 \\
 q_{23} &= \frac{q}{\epsilon_{24}} \sqrt{J_{23}} (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}}) \\
 q_{34} &= \frac{q}{\epsilon_{24}} \sqrt{J_{34}} (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}}).
 \end{aligned}$$

44. Diese Rechnungen sind nun aber infolge des wiederholten Wurzelziehens und Quadrierens nicht gerade einfach, jedenfalls aber sehr zeitraubend. Die Notwendigkeit, die berechneten Querschnitte schliesslich auf die gangbaren Normalquerschnitte abzurunden, rechtfertigt also um so mehr die Einführung einer einfacheren Berechnungsmethode. Diese erhalten wir, wenn wir anstatt der Bedingung des geringsten Kupfervolumens diejenige des konstanten Querschnittes einführen, indem wir bestimmen, dass die Summe der Querschnitte der verzweigten Leitungen gleich dem Querschnitt der zugehörigen unverzweigten Strecke sei. Wir erhalten also zu dem Gleichungssystem (43)

$$q_{01} = \frac{J_{01} l_{01}}{\epsilon_{01}} q; \quad q'_{12} = \frac{J'_{12} l'_{12}}{\epsilon - \epsilon_{01}} q; \quad q'_{12} = \frac{J''_{12} l''_{12}}{\epsilon - \epsilon_{01}} q$$

als vierte das System eindeutig gestaltende Gleichung:

$$q'_{12} + q''_{12} = q_{12} = q_{01}$$

oder

$$\frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{12}} = \frac{J'_{12} l'_{12}}{J_{01} l_{01}} + \frac{J''_{12} l''_{12}}{J_{01} l_{01}} = \frac{l_{01}}{\lambda_{12}}$$

wo nunmehr λ die fiktive Länge der linearen Strommomente darstellt. Es wird also allgemein die fiktive Leitungslänge für n -Zweige:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{J_{01}} \sum_1^n J_{12}^{(v)} l_{12}^{(v)} \quad (49)$$

und

$$\frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{12}} = \frac{l_{01}}{\lambda_{12}} \quad (50)$$

1) Diese Gleichungen sind auf anderem Wege bereits von E. MCLENDORFF, ETZ 1892, S. 49 entwickelt worden.

der Spannungsverlust ist also proportional zur Länge unabhängig von dem Leitungsstrom.

Um nun bei einer Stromverteilung, wie in Fig. 32, nicht zu oft die Querschnitte zu wechseln, wird man für jede Strecke zwischen zwei Verzweigungspunkten den Querschnitt konstant halten, indem man den fiktiven Strom der Querschnittsermittlung nach Gleichung (X) zu Grunde legt.

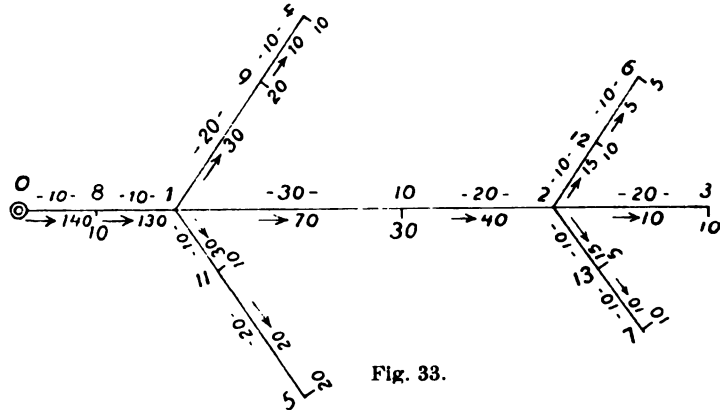


Fig. 33.

Beispiel.

Um einen Überblick über die verschiedenen Berechnungsarten und deren Ergebnisse zu erhalten, berechnen wir die Querschnitte einer Leitungsverzweigung nach Fig. 33, indem wir einen maximalen (einfachen) Spannungsverlust von $\varepsilon = 1$ Volt annehmen.

1. Geringstes Kupfervolumen.

Nach Gleichung (48) ist:

$$\sqrt{J_{01}} = \frac{1}{20} (10 \sqrt{140} + 10 \sqrt{130}) = 11.62$$

$$\sqrt{J_{12}} = \frac{1}{50} (30 \sqrt{70} + 20 \sqrt{40}) = 7.76$$

$$\sqrt{J_{14}} = \frac{1}{30} (20 \sqrt{30} + 10 \sqrt{10}) = 4.70$$

$$\sqrt{J_{15}} = \frac{1}{30} (10 \sqrt{30} + 20 \sqrt{20}) = 4.81$$

$$\sqrt{J_{26}} = \frac{1}{20} (10 \sqrt{15} + 10 \sqrt{5}) = 3.05$$

$$\sqrt{J_{27}} = \frac{1}{20} (10 \sqrt{15} + 10 \sqrt{10}) = 3.52$$

Nach Gleichung (46):

$$\lambda_{23}^2 = \frac{1}{7.76^2} [(20 \cdot 3.05)^2 + (20 \sqrt{10})^2 + (20 \cdot 3.52)^2]$$

$$\lambda_{23} = 14.6$$

$$l_{12} + \lambda_{23} = 50 + 14.6 = 64.6$$

$$\lambda_{12}^2 = \frac{1}{11.62^2} [(30 \cdot 4.70)^2 + (64.6 \cdot 7.76)^2 + (30 \cdot 4.81)^2]$$

$$\lambda_{12} = 46.5$$

$$l_{01} + \lambda_{12} = 20 + 46.5 = 66.5.$$

Nach Gleichung (45):

$$\varepsilon_{01} = 1 \cdot \frac{20}{66.5} = 0.308$$

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0.692.$$

$$\varepsilon_{12} = 0.692 \cdot \frac{50}{64.6} = 0.535$$

$$\varepsilon_{23} = 0.692 - 0.535 = 0.157.$$

Nach Gleichung (IV):

$$q_{08} = \frac{0.018}{0.308} (10 \sqrt{140} + 10 \sqrt{130}) \sqrt{140} = 13.6 \sqrt{140} = 160 \pm 150$$

$$q_{81} = 13.6 \sqrt{130} = 155 \pm 150$$

$$q_{19} = \frac{0.018}{0.692} (20 \sqrt{30} + 10 \sqrt{10}) \sqrt{30} = 3.66 \sqrt{30} = 20.0 \pm 25$$

$$q_{94} = 3.66 \sqrt{10} = 11.5 \pm 10$$

$$q_{111} = \frac{0.018}{0.692} (10 \sqrt{30} + 20 \sqrt{20}) \sqrt{30} = 3.72 \sqrt{30} = 20.4 \pm 25$$

$$q_{115} = 3.72 \sqrt{20} = 16.7 \pm 16$$

$$q_{110} = \frac{0.018}{0.535} (30 \sqrt{70} + 20 \sqrt{40}) \sqrt{70} = 13.1 \sqrt{70} = 109 \pm 120$$

$$q_{102} = 13.1 \sqrt{40} = 82.9 \pm 70$$

$$q_{212} = \frac{0.018}{0.157} (10 \sqrt{15} + 10 \sqrt{5}) \sqrt{15} = 7.01 \sqrt{15} = 27.2 \pm 25$$

$$q_{126} = 7.01 \sqrt{5} = 15.6 \pm 16$$

$$q_{23} = \frac{0.018}{0.157} \cdot 20 \cdot 10 = 23.0 \pm 25$$

$$q_{213} = \frac{0.018}{0.157} (10 \sqrt{15} + 10 \sqrt{10}) \sqrt{15} = 8.08 \sqrt{15} = 31.3 \pm 25$$

$$q_{137} = 8.08 \sqrt{10} = 25.5 \pm 25.$$

Für die hinter dem Annäherungszeichen stehenden fabrikationsmässigen Querschnitte würden sich die folgenden Spannungsverluste ergeben:

$$\varepsilon_{01} = 0.324; \varepsilon_{12} = 0.520; \varepsilon_{23} = 0.144,$$

und die maximalen Verluste sind:

$$\text{in Punkt 3: } 0.988$$

$$\text{" " 4: } 0.935$$

$$\text{" " 5: } 0.990$$

$$\text{" " 6: } 1.008$$

$$\text{" " 7: } 1.024.$$

Der theoretisch erreichbare minimale Kupferaufwand bei Verlegung der berechneten Querschnitte würde sein:

$$V = \Sigma/q = 10370 \text{ cm}^3.$$

Der praktisch erreichbare minimale Kupferaufwand wird:

$$V' = 10620 \text{ cm}^3 = 1.025 V.$$

2. Konstanter Querschnitt.

Nach Gleichung (51) wird:

$$J_{01} = \frac{1}{20} (10 \cdot 140 + 10 \cdot 130) = 135$$

$$J_{12} = \frac{1}{50} (30 \cdot 70 + 20 \cdot 40) = 58$$

$$J_{14} = \frac{1}{30} (20 \cdot 30 + 10 \cdot 10) = 23.3$$

$$J_{15} = \frac{1}{30} (10 \cdot 30 + 20 \cdot 20) = 23.3$$

$$J_{26} = \frac{1}{20} (10 \cdot 15 + 10 \cdot 5) = 10$$

$$J_{27} = \frac{1}{20} (10 \cdot 15 + 10 \cdot 10) = 12.5.$$

Nach Gleichung (49):

$$\lambda_{23} = \frac{1}{58} (10 \cdot 20 + 10 \cdot 20 + 12.5 \cdot 20) = 11.2$$

$$l_{12} + \lambda_{23} = 61.2.$$

$$\lambda_{12} = \frac{1}{135} (23.3 \cdot 30 + 58 \cdot 61.2 + 23.3 \cdot 30) = 36.7$$

$$l_{01} + \lambda_{12} = 56.7.$$

Nach Gleichung (50):

$$\varepsilon_{01} = 1 \cdot \frac{20}{56.7} = 0.353$$

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0.647$$

$$\varepsilon_{12} = 0.647 \cdot \frac{50}{61.2} = 0.528$$

$$\varepsilon_{23} = 0.647 - 0.528 = 0.119.$$

Daher:

$$q_{01} = \frac{0.018 \cdot 135 \cdot 20}{0.353} = 138 \div 150$$

$$q_{14} = q_{15} = \frac{0.018 \cdot 23.3 \cdot 30}{0.647} = 19.4 \div 25$$

$$q_{12} = \frac{0.018 \cdot 58 \cdot 50}{0.528} = 99.0 \div 95$$

$$q_{23} = q_{26} = \frac{0.018 \cdot 10 \cdot 20}{0.119} = 30.2 \div 35$$

$$q_{27} = \frac{0.018 \cdot 12.5 \cdot 20}{0.119} = 37.8 \div 35.$$

Es ist also bis auf kleine Fehler infolge der **angest** ge-
keit der Rechnung

$$q_{01} = q_{12} + q_{14} + q_{15}; \quad q_{12} = q_{14} \quad q_{23} = q_{26} = q_{27}$$

Ferner ist für die praktischen Querschnitte:

$$\varepsilon_{01} = 0.324; \varepsilon_{12} = 0.550; \varepsilon_{23} = 0.103,$$

und die maximalen Verluste sind:

	in Punkt 3:	0.977
"	"	4: 0.828
"	"	5: 0.828
"	"	6: 0.977
"	"	7: 1.003.

Der wirkliche Kupferaufwand ist hier:

$$V'' = 11350 \text{ cm}^3 = 1.095 V = 1.069 V'.$$

Er übersteigt das theoretisch mögliche Minimum des Kupfervolumens in diesem Falle also nur um 9.5% , das praktische Minimum um 6.9% , d. h. beide Ausführungen sind in Beziehung auf Kupferaufwand gleichwertig. Dagegen ist die zweite Querschnittsbemessung der ersteren aus dem Grunde vorzuziehen, weil wir bei ihr mit vier Querschnitten auskommen, und ein Wechsel derselben nur in den Verzweigungspunkten statt hat, in denen ja so wie so Lötungen vorgenommen werden müssen, während wir im ersten Falle sechs verschiedene Querschnitte haben, und Wechsel derselben auch in den Strecken zwischen den Verzweigungspunkten vorkommen.

3. Berücksichtigung des Hauptstranges allein; konstante Stromdichte.

Als Hauptstrang haben wir die Strecke 0127 zu betrachten, da $(10 \cdot 15 + 10 \cdot 10) > 10 \cdot 20$ ist; ebenso treten die Zweige 14 und 15 gegen 12 zurück. Nach Gleichung (IX) ist:

$$j = \frac{\varepsilon}{\rho l_n} = \frac{1}{0.018 \cdot 90} = 0.617.$$

Also nach Gleichung (X):

$$q_{01} = \frac{135}{0.617} = 218 \div 240$$

$$q_{12} = \frac{58}{0.617} = 93.0 \div 95$$

$$q_{27} = \frac{12.5}{0.617} = 20.2 \div 16,$$

da die fiktiven Ströme

$$J_0 = 135; J_{12} = 58; J_{27} = 12.5; J_{14} = J_{15} = 23.3; J_{28} = 10.$$

Die Spannungsverluste sind:

$$\varepsilon_{01} = \frac{135 \cdot 20 \cdot 0.018}{240} = 0.203$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{58 \cdot 50 \cdot 0.018}{95} = 0.550$$

$$\varepsilon_{27} = \frac{12.5 \cdot 20 \cdot 0.018}{16} = 0.281,$$

also

$$\varepsilon = 1.034 \text{ (anstatt } 1.0).$$

Für die Zweigstrecken wird, da $\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0.797$ und $\varepsilon - \varepsilon_{02} = 0.247$,

$$q_{14} = q_{15} = \frac{23.3 \cdot 30 \cdot 0.018}{0.797} = 15.8 : 16$$

$$q_{23} = q_{26} = \frac{10 \cdot 20 \cdot 0.018}{0.247} = 14.6 : 16,$$

also die maximalen Spannungsverluste in den Punkten 3, 4, 5 und 6 werden etwas kleiner als 1 Volt. Der wirkliche Kupferaufwand ist:

$$I''' = 11470 \text{ cm}^3 = 1.11 I' = 1.08 I'' = 1.01 I''',$$

also um etwa 11% grösser als das theoretische und 8% grösser als das praktische Minimum; dem Kupferaufwand bei konstantem Querschnitt ist er praktisch gleich.

4. Berücksichtigung des Hauptstranges allein; konstanter Querschnitt.

Hier wird nach Gleichung (VII):

$$q = \frac{0.018}{1} (10 \cdot 140 + 10 \cdot 130 + 30 \cdot 70 + 20 \cdot 40 + 10 \cdot 15 + 10 \cdot 10) \\ = 105 : 120.$$

Für q_{27} kann demnach ein kleinerer Querschnitt gewählt werden. Es ist:

$$\varepsilon_{01} = 0.405; \varepsilon_{12} = 0.435$$

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0.595; \varepsilon - \varepsilon_{02} = 0.160,$$

also:

$$q_{11} = q_{15} = 21.2 : 25$$

$$q_{27} = 28.1 : 25$$

$$q_{23} = q_{26} = 22.5 : 25.$$

Hier haben die Querschnitte der Zweigleitungen noch günstige Dimensionen angenommen, da wir den Querschnitt des ersten Teils der Leitung verstärken mussten, weil der berechnete kein Normalquerschnitt war; wir näherten uns also dem vorgehenden Fall 3. Nehmen wir dagegen an, der berechnete Querschnitt könne verlegt werden, setzen wir also $q = 105$ in die Rechnung ein, so erhalten wir:

$$\varepsilon_{01} = 0.463; \varepsilon_{12} = 0.496; \varepsilon_{27} = 0.041,$$

also

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0.537$$

$$q_{14} = 23.4 = q_{15}$$

$$q_{26} = 87.8 = q_{23}.$$

Die den geringeren Strom führenden Zweigleitungen 23 und 26 erhalten einen bedeutend grösseren Querschnitt als die Zweige 14 und 15.

Ferner wird der Kupferaufwand bei den fabrikationsmässigen Querschnitten:

$$I^{IV} = 11400 \text{ cm}^3 = 1.10 I' = 1.00 I''',$$

dagegen bei Verlegung der berechneten Querschnitte:

$$I'V = 14370 \text{ cm}^3 = 1.39 I' = 1.25 I'''.$$

Im letzten Falle würde der Kupferaufwand das theoretische Minimum um 39 %, denjenigen für konstante Stromdichte um 25 % übersteigen.

Wechselstrom-Stromkreise.

In Wechselstromkreisen treten an Stelle des Widerstandes w und der Leitfähigkeit g bekanntlich der Wechselstromwiderstand oder die Impedanz z und die Admittanz y , und zwar addieren sich, genau wie in Gleichstromkreisen die ersteren, in Wechselstromkreisen die Impedanzen bei Reihenschaltung, die Admittanzen bei Parallelschaltung, nur ist die Addition wie

bei Vektorgrößen geometrisch zu vollziehen, obwohl Impedanz und Admittanz skalare Größen sind, die erst durch Multiplikation mit den Vektoren J bzw. \mathcal{E} zu Vektorgrößen werden. Um die

46.
Bezeichnungen und
Definitionen.

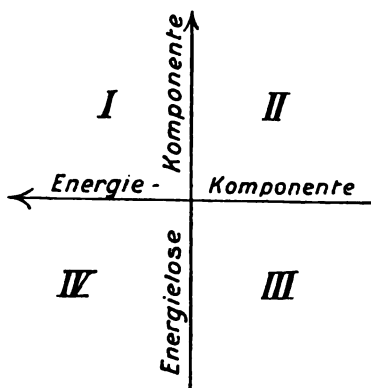


Fig. 34.

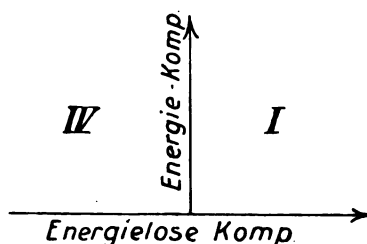


Fig. 35.

geometrischen Operationen in arithmetische zu verwandeln, stellt man die Wechselstromgrößen als komplexe Ausdrücke dar,¹⁾ indem man den einen der beiden die Energie bestimmenden Vektoren \mathcal{E} oder J in eine zum anderen Vektor parallele, die Energiekomponente, und in eine dazu senkrechte, die energielose Komponente, oder aber beide Vektoren in die entsprechenden um 90° gegeneinander verschobenen Komponenten zerlegt und der energielosen Komponente zur Kennzeichnung das Zeichen $j = \sqrt{-1}$ beifügt.

Wenden wir zur graphischen Darstellung der Vektorgrößen von den beiden in der Mathematik gebräuchlichen Koordinatensystemen das rechtsdrehende (Fig. 34) an, indem wir, wie gewöhnlich, die Energiekomponente in der Richtung der Abscisse, die energielose Komponente in der Richtung der Ordinate auftragen, so brauchen wir, da sich die Phasenverschiebungswinkel im allgemeinen zwischen 0 und $\pm 90^\circ$ bewegen, vorzugsweise den ersten und vierten Quadrant. Der bequemeren Zeichnung wegen drehen wir daher

1) S. Hdb. I, 2, S. 36. Die komplexen Größen sind zuerst von HELMHOLTZ (Telephon und Klangfarbe, Berliner Akademie 1878) zur Bezeichnung elektrischer Vektoren verwandt worden. Allgemein wurde diese Bezeichnungsweise in elektrotechnischen Kreisen bekannt durch die Arbeiten von FRANKE (ETZ 1891, S. 451) und besonders durch die von C. P. STEINMETZ (ETZ 1893 ff.)

das ganze Koordinatensystem um 90° in der Drehrichtung der Vektoren und erhalten so das in Fig. 35 dargestellte Koordinatensystem, in dem die Energiekomponenten parallel zur Ordinatenachse, die energielosen Komponenten in der Richtung der Abscissenachse aufgetragen werden, und zwar in der positiven Richtung die energieverzehrenden bzw. die voreilenden, positivem Winkel φ entsprechenden energielosen Komponenten, die energieerzeugenden bzw. die nacheilenden, negativem Winkel φ entsprechenden energielosen Komponenten in der negativen Richtung.

Stellen also ganz allgemein $O\vec{E} = \vec{\varepsilon}^1$) und $O\vec{J} = \vec{J}$ die zusammengehörigen Spannungs- und Stromvektoren eines Stromkreises dar (Fig. 36),

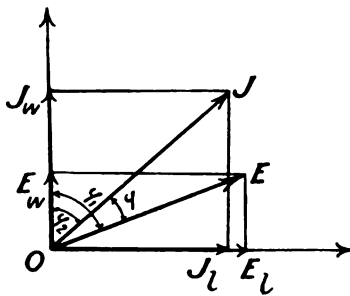


Fig. 36.

deren Grössen durch die Längen $O\vec{E} = \varepsilon$ und $O\vec{J} = J$ und deren Richtung durch die Winkel φ_1 und φ_2 gegen die Ordinatenachse (Achse der Energiekomponenten) gegeben sind, so eilt in der Darstellung der Figur, wo $\varphi_1 > \varphi_2$ ist, die Spannung dem Strom vor, oder umgekehrt der Strom der Spannung nach. Wir bezeichnen dieses Verhältnis nach HEINKE²⁾ kurz, indem wir für Voreilung den ersten, für Nacheilung den vierten Koordinatenquadrant zwischen die beiden Vektoren setzen, also

$$\varepsilon \vdots J \text{ bzw. } J \vdots \varepsilon$$

und „ ε vorwinklig J “ bzw. „ J nachwinklig ε “ lesen.

Da beide Vektoren im ersten Quadrant liegen, so haben wir für die Zerlegung von ε und J folgende Schreibweise, wenn ε_w und J_w die Energiekomponenten, ε_l und J_l die energielosen Komponenten bezeichnen:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_w + j\varepsilon_l = \varepsilon (\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1) = \varepsilon e^{j\varphi_1} \\ J &= J_w + jJ_l = J (\cos \varphi_2 + j \sin \varphi_2) = J e^{j\varphi_2}.\end{aligned}$$

wobei e die Basis der natürlichen Logarithmen, also $2.71828 \dots$ bezeichnet. Aus dieser Darstellung erhält man daher rückwärts die Länge und den Richtungswinkel der Vektoren durch die Beziehungen:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \sqrt{\varepsilon_w^2 + \varepsilon_l^2} & \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_w} \\ J &= \sqrt{J_w^2 + J_l^2} & \operatorname{tg} \varphi_2 &= \frac{J_l}{J_w}.\end{aligned}$$

Die von den beiden Vektoren geleistete Energie \mathcal{E}' ist gleich dem skalaren Produkt beider, also

$$\mathcal{E}' = \varepsilon J \cos \varphi$$

d. h. bei einphasigem Wechselstrom ist die gesamte Leistung

$$\mathcal{E} = 2 \mathcal{E}' = 2 \varepsilon J \cos \varphi = EJ \cos \varphi$$

und bei Drehstrom

$$\mathcal{E} = 3 \mathcal{E}' = 3 \varepsilon J \cos \varphi = \sqrt{3} EJ \cos \varphi.$$

1) ε stellt stets die Spannung gegen den Nullpunkt des Systems, E die Spannung zwischen zwei Leitern dar. Vgl. Fussnote 1, S. 2.

2) Hdb. I, 2, S. 94 mit einer kleinen Änderung entsprechend der geänderten Stellung unseres Koordinatensystems.

Ferner sind analog dem Widerstand und der Leitfähigkeit bei Gleichstrom die Impedanz und Admittanz definiert als Quotienten der beiden Vektoren $\dot{\varepsilon}$ und \dot{J} , nämlich

$$Z = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{J}} \text{ und } Y = \frac{\dot{J}}{\dot{\varepsilon}}.$$

47.
Die
Leitungs-
konstanten
und ihre Be-
ziehungen
zu einander.

Daher wird

$$\left. \begin{aligned} Z &= \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{J}} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{J}} e^{j\varphi} \\ Y &= \frac{\dot{J}}{\dot{\varepsilon}} e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{J}} e^{-j\varphi} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (52)$$

Z und Y sind also ebenfalls komplexe Grössen, die aber als Skalare nicht mehr von der Lage der beiden Vektoren $\dot{\varepsilon}$ und \dot{J} in der Koordinatenebene, sondern nur von ihrer Lage zu einander, also von dem $\sphericalangle (\dot{\varepsilon}, \dot{J}) = \varphi$ abhängen.

Bezeichnen wir die Länge von Z und Y mit $\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{J}} = z$ und $\frac{\dot{J}}{\dot{\varepsilon}} = y$ und ihre energieverzehrenden Komponenten mit n , „wirksamer Widerstand“ oder Resistanz, und g , „wirksame Leitfähigkeit“ oder Konduktanz, ihre energielosen Komponenten mit x , Reaktanz, und b , Suszeptanz,¹⁾ so wird nach Gleichung (52):

$$\left. \begin{aligned} Z &= z (\cos \varphi + j \sin \varphi) = n + jx \quad \left. \begin{array}{l} \dot{\varepsilon} \perp \dot{J} \\ \dot{J} \perp \dot{\varepsilon} \end{array} \right\} \dots \dots (53) \\ Y &= y (\cos \varphi - j \sin \varphi) = g - jb \end{aligned} \right\}$$

und entsprechend würde:

$$\left. \begin{aligned} Z &= z (\cos \varphi - j \sin \varphi) = n - jx \quad \left. \begin{array}{l} \dot{\varepsilon} \perp \dot{J} \\ \dot{J} \perp \dot{\varepsilon} \end{array} \right\} \dots \dots (53a) \\ Y &= y (\cos \varphi + j \sin \varphi) = g + jb \end{aligned} \right\}$$

Ferner ist stets:

$$Z = \frac{1}{Y} \dots \dots \dots (54)$$

oder:

$$\begin{aligned} (n + jx) (g - jb) &= 1 \\ (n - jx) (g + jb) &= 1 \end{aligned}$$

d. h. aber:

$$\begin{aligned} ng + xb &= 1 \\ nb - xg &= 0 \end{aligned}$$

woraus die später abgeleitete Formel $g = \frac{n}{x^2}$ folgt.

Wir haben also für die Bestimmung des Vorzeichens für den imaginären Teil die folgende einfache Regel:

Vor[nach]eilende Spannung ($\varphi = \sphericalangle (\dot{\varepsilon}, \dot{J}) > [<] 0$) bedingt positive [negative] Reaktanz, und entsprechend nach[vor]eilender Strom ($\varphi = \sphericalangle (\dot{J}, \dot{\varepsilon}) < [>] 0$) negative [positive] Suszeptanz.

1) Über die Benennung dieser Grössen s. FELDMANN, ETZ 1898, S. 698.

Die Beziehungen zwischen den Leitungskonstanten z und y und ihren Komponenten lassen sich nach Fig. 37 a und b sofort ablesen. Es ist:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Impedanz} & z = \sqrt{n^2 + x^2} = \frac{1}{y} \\ \text{Admittanz} & y = \sqrt{g^2 + b^2} = \frac{1}{z} \\ \text{Wirksamer Widerstand} & . n = z \cos \varphi = \frac{g}{y^2} \\ \text{Wirksame Reaktanz} & . x = z \sin \varphi = \frac{b}{y^2} \\ \text{Wirksame Leitfähigkeit} & g = y \cos \varphi = \frac{n}{z^2} \\ \text{Wirksame Suszeptanz} & . b = y \sin \varphi = \frac{x}{z^2} \end{array} \right\} . . . (55)$$

$$\text{Ferner: } \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{n} = \frac{b}{g}; \sin \varphi = \frac{x}{z} = \frac{b}{y}; \cos \varphi = \frac{n}{z} = \frac{g}{y}.$$

Während also bei Gleichstromkreisen der Widerstand bzw. die Leitfähigkeit die einzige charakteristische Leitungskonstante ist, müssen bei Wechselstromkreisen ausser dem wirksamen Widerstande bzw. der wirksamen

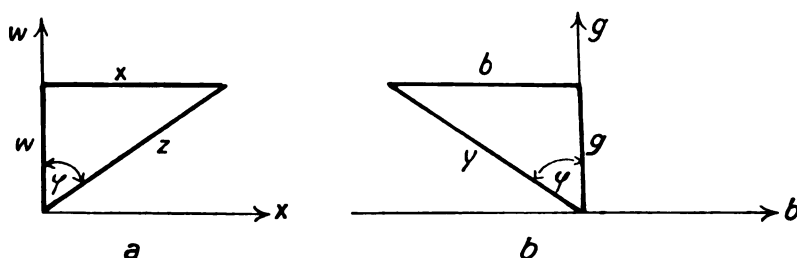


Fig. 37.

Leitfähigkeit die Reaktanz bzw. Suszeptanz oder der Phasenverschiebungswinkel φ bekannt sein, um die Leitungsimpedanz bzw. Admittanz eindeutig zu bestimmen. Sind aber die Widerstands- bzw. Leitfähigkeitskonstanten des Stromkreises gegeben, so lässt sich, ganz wie bei Gleichstrom, der Stromvektor aus dem Spannungsvektor mit Hilfe der Leitfähigkeitskonstanten y , g und b , der Spannungsvektor aus dem Stromvektor mit Hilfe der Widerstandskonstanten z , n und x bestimmen, und es ist bei gegebenem \dot{J} (Fig. 38):

$$\dot{E} = \dot{J} Z = \dot{J} (n + jx) \left[= \frac{\dot{J}}{g - jb} \right], \text{ wenn } \dot{E} \perp \dot{J}$$

$$\dot{E} = \dot{J} Z = \dot{J} (n - jx) \left[= \frac{\dot{J}}{g + jb} \right], \text{ wenn } \dot{E} \parallel \dot{J}$$

und bei gegebenem \dot{E} (Fig. 39):

$$\dot{J} = \dot{E} Y = \dot{E} (g + jb) \left[= \frac{\dot{E}}{n - jx} \right], \text{ wenn } \dot{J} \perp \dot{E}$$

$$\dot{J} = \dot{E} Y = \dot{E} (g - jb) \left[= \frac{\dot{E}}{n + jx} \right], \text{ wenn } \dot{J} \parallel \dot{E}$$

Sind nun die Energieverbraucher in Reihe geschaltet, so wird der Strom konstant gehalten, ist also als gegeben anzusehen, und die resultierende Spannung ist:

$$E = \sum_1^n E_v = J \sum_1^n (w_v + jx_v) = J(w + jx) = Jz \quad . \quad (56)$$

und zwar ist x_v positiv einzusetzen bei voreilender Spannung, d. h. induktiver Reaktanz, negativ bei nacheilender Spannung, d. h. Kapazitätsreaktanz. Ferner ist

$$w = \sum_1^n w_v; x = \sum_1^n x_v; z = \sqrt{w^2 + x^2}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{w} \quad . \quad (57)$$

Bei Parallelschaltung der Energieverbraucher ist die Spannung konstant und gegeben, daher wird die resultierende Stromstärke:

$$J = \sum_1^n J_v = E \sum_1^n (g_v + jb_v) = E(g + jb) = Ey \quad . \quad (58)$$

Hier ist b positiv einzusetzen bei voreilem Strom d. h. Kapazitätssuszeptanz, negativ bei nacheilem Strom, d. h. induktiver Suszeptanz. Es ist:

$$g = \sum_1^n g_v; b = \sum_1^n b_v; y = \sqrt{g^2 + b^2}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g} \quad . \quad (59)$$

Hiermit ist gezeigt, dass ein prinzipieller Unterschied in der Behandlung von Gleich- und Wechselstromkreisen nicht besteht; die Ermittlung der Strom-

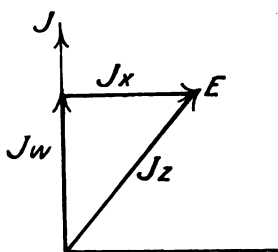


Fig. 38.

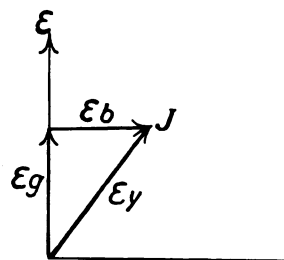


Fig. 39.

und Spannungsverteilung ist in beiden Fällen die gleiche, sobald die Konstanten des Stromkreises bekannt sind. Jedoch ist die Bestimmung der letzteren nicht mehr ganz so einfach wie bei Gleichstrom, da sie bei Wechselstrom oft nicht konstant sind, sondern von der Grösse der Strom- und Spannungsvektoren und von der Frequenz abhängen.

Der wirksame Widerstand des Wechselstromkreises ist definiert als die Energie verzehrende Komponente der Impedanz, ist also gleich dem Quotient aus der gesamten in Wärme verwandelten Energie durch das Quadrat des den Stromkreis durchfließenden Stromes; also wenn \mathcal{E} die in Wärme verwandelte Energie bezeichnet:

$$w = \frac{\mathcal{E}}{J^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (60)$$

48.
Die
Bestimmung
der
Leitungs-
konstanten
des Wechsel-
strom-
kreises.
Widerstand.

Der wirksame Widerstand fällt demnach nur dann mit dem OHM'schen Widerstand des Gleichstromkreises zusammen, wenn in dem Wechselstromkreise

(abgesehen von mechanischer, chemischer u. s. w. Arbeit) alle Energie als JOULEsche Wärme im Kupfer verzehrt wird, wenn also die magnetische und dielektrische Permeabilität des den Stromkreis umgebenden Mediums und des Leitungsmaterials von der Stromstärke unabhängig sind, und wenn die Stromdichte im ganzen Leitungsquerschnitt gleichmässig ist; mit andern Worten, wenn weder magnetische noch dielektrische Hysteresisarbeit noch Wirbelstromarbeit in dem Stromkreis oder dem umgebenden Medium zu leisten sind. Daraus folgt aber sofort, dass im allgemeinen der wirksame Widerstand sowie die wirksame Leitfähigkeit von Wechselstromkreisen von Spannung, Strom und Frequenz abhängen, also nicht mehr, wie bei Gleichstrom, Konstanten des Stromkreises im eigentlichen Sinne sind. Im besonderen ist der Widerstand auch bei völliger Abwesenheit von magnetischer und dielektrischer Hysteresis von der Frequenz abhängig und steigt infolge des sogenannten Hauteffektes (Skinneffektes)¹⁾ mit steigender Periodenzahl und mit dem Leitungsdurchmesser. Über diese Abhängigkeit giebt die folgende von HOSPITALIER nach der Formel von LORD KELVIN berechnete Tabelle VI Auskunft, in der k den Reduktionsfaktor bezeichnet, mit dem der Gleichstromwiderstand eines Kupferdrahtes w_g zu multiplizieren ist, um den durch Hauteffekt vergrößerten wirksamen Wechselstromwiderstand w_w zu erhalten. p ist die Frequenz (Periodenzahl in einer Sekunde) und d der Drahtdurchmesser in cm.

Tabelle VI.

Reduktionsfaktor für den Einfluss des Hauteffektes.

$p d^2$	$k = \frac{w_w}{w_g}$	$p d^2$	$k = \frac{w_w}{w_g}$
0	1·0000	1620	1·8628
20	1·0000	2000	2·0430
80	1·0001	2420	2·2190
180	1·0258	2880	2·3937
320	1·0805	5120	3·0956
500	1·1747	8000	3·7940
720	1·3180	18000	5·5732
980	1·4920	32000	7·3250
1280	1·6778	—	—

Die Tabelle gilt natürlich nicht für Eisendrähte, da ja ausdrücklich die Abwesenheit von magnetischer Hysteresis angenommen wurde. Aus den Zahlen ist ersichtlich, dass für die in Deutschland angewendete normale Frequenz 50 ein Durchmesser von 1·6 cm erst eine Vergrößerung des OHMSchen Widerstandes um 0·1 % hervorrufen würde, dass also im allgemeinen die Widerstandserhöhung infolge Hauteffektes für praktische Fälle vollständig zu vernachlässigen ist.

Der wirksame Widerstand von Wechselstromkreisen wird also bei Abwesenheit von magnetischer und dielektrischer Hysteresis, also z. B. bei Luftleitungen aus Kupferdraht, wie bei Gleichstrom berechnet und mit dem

1) GALILEO FERRARIS, Wissenschaftliche Grundlagen.

können wir sie mit dem Widerstand in Reihe geschaltet denken (Fig. 40). Ist dann J der im Stromkreise (Leitung) fließende Strom, E die darin verzehrte Spannung, w der Widerstand und L die Induktivität für 1 m, also lL die gesamte Induktivität, und $\omega = 2\pi p$ die Periodenzahl in 2π Sekunden, so wird:

$$E = J(w + jlL\omega) = J(w + jx) = Jz \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

Also die Impedanz ist

$$z = w + jx = w + jlL\omega = \sqrt{w^2 + (lL\omega)^2} \quad . \quad . \quad . \quad (63)$$

und die induktive Reaktanz

$$x = lL\omega \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (64)$$

51.
Kapazität.

Auch die wirksame Kapazität kann nur für einige einfache Fälle der Leitungsführung berechnet werden;¹⁾ in komplizierteren Fällen kann man durch Messung des Ladestroms die wirksame Kapazität selbst in den Fällen be-



Fig. 40.

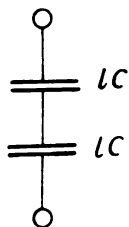


Fig. 41.

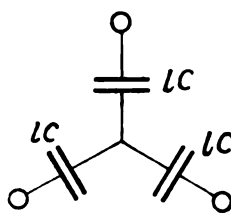


Fig. 42.

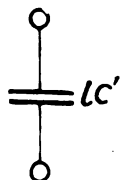


Fig. 43.

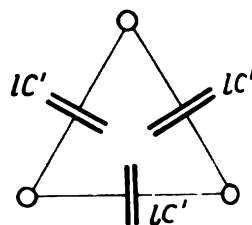


Fig. 44.

stimmen, in denen eine wahre, der Grundgleichung $Q = CU$ entsprechende Kapazität überhaupt nicht existiert [55].

Um über die Anwendung der folgenden Kapazitätsformeln²⁾ keine Unklarheit entstehen zu lassen, bemerke ich dazu folgendes: Zwecks einfacher Berechnung des Leitungsquerschnittes aus dem Spannungsabfall, dem Linienstrom und der Impedanz wurden in den vorhergehenden Entwicklungen Widerstand und Induktivität stets auf den einfachen Leiter von der Länge l bezogen, so dass sich z. B. die gesamte Induktivität für ein Zweileiterkabel zu $2lL$, für ein Drehstromkabel zu $3lL$ berechnet. Wollen wir in Übereinstimmung hiermit auch die Kapazitätsreaktanz für den einfachen Leiter in

1) Aus der reichen, diesen Gegenstand behandelnden Litteratur seien verzeichnet: BREISIG, Über die Bestimmung der elektrischen Kapazität, ETZ 1898, S. 772 und 1899, S. 127; Über die Definition der elektrischen Eigenschaften, ETZ 1902, S. 1137; Vorschläge zur Definition der elektrischen Eigenschaften, ETZ 1905, S. 460. H. KATH, Die Kapazität von Kabeln ETZ 1903, S. 38. LEO LICHTENSTEIN, Über die rechnerische Bestimmung der Kapazität, ETZ 1904, S. 106.

2) Die verschiedenen Autoren definieren die wirksame (resultierende) Kapazität je nach ihren Zwecken verschieden, und zwar entweder als Kapazität zwischen zwei Leitern oder als solche zwischen einem Leiter und Erde bzw. dem neutralen Punkt des Systems. Hier wird nur von der letzten Definition Gebrauch gemacht.

der Form $\frac{10^6}{j l C \omega}$ erhalten (worin C die Kapazität der Längeneinheit in Mikrofarad bedeutet), so müssen wir die wirksame Kapazität $l C 10^{-6}$ auf den einfachen Leiter gegen Erde oder den neutralen Punkt beziehen, wir müssen sie also nach den Figuren 41 und 42 anordnen. Für das Zweileiterkabel definieren wir demgemäss:

$$\frac{Q}{\varepsilon} = l C \cdot 10^{-6} = \frac{Q}{E/2}, \quad (65)$$

und für das Drehstromkabel

$$\frac{Q}{\varepsilon} = l C \cdot 10^{-6} = \frac{Q}{E/\sqrt{3}}, \quad (66)$$

wenn wie gewöhnlich ε das Potential des Leiters (Spannung gegen den neutralen Punkt bzw. Erde), E die Spannung zwischen zwei Leitern (bei Drehstrom also die verkettete Spannung) bedeutet.

Dagegen würde sich im Vergleich mit unserer Definition die Kapazität C' zwischen zwei Leitern auf folgendem Wege ergeben:

Da bei der Schaltung der Kapazitäten nach Fig. 43 und 44 die auf den Leitern befindliche Ladung Q bzw. der die Leiter durchfliessende Ladestrom J natürlich dieselbe Grösse besitzen wie im Falle der Fig. 41 und 42 — beide Schaltungen sind ja nur verschiedene Darstellungsarten derselben Verhältnisse —, so wird für Wechselstrom:

$$Q = l C' \cdot 10^{-6} E = l C' \cdot 10^{-6} \cdot 2 \varepsilon,$$

also ist nach Gleichung (65):

$$l C' \cdot 10^{-6} \cdot 2 \varepsilon = l C \cdot 10^{-6} \varepsilon,$$

$$\text{d. h.} \quad C' = \frac{1}{2} C,$$

und für Drehstrom, wenn wir mit Q' die auf dem Kondensator C' befindliche Elektrizitätsmenge bezeichnen:

$$Q = \sqrt{3} Q' = \sqrt{3} l C' \cdot 10^{-6} E = 3 l C' \cdot 10^{-6} \varepsilon,$$

daher nach Gleichung (66):

$$3 l C' \cdot 10^{-6} \varepsilon = l C \cdot 10^{-6} \varepsilon,$$

$$\text{d. h.} \quad C' = \frac{1}{3} C.$$

Der mittels C berechnete, in das Dielektrikum eintretende Ladestrom wird bei Zweileiterkabeln

$$J_e = l C \omega \cdot 10^{-6} \varepsilon (= l C' \omega \cdot 10^{-6} E). \quad . . . (65a)$$

J_e ist zugleich der den Leiter durchfliessende Strom und steht senkrecht zu ε . Bei Drehstromkabeln dagegen ist der in das Dielektrikum eintretende Strom bei der Definition nach Fig. 42

$$J_e = l C \omega \cdot 10^{-6} \frac{E}{\sqrt{3}} = l C \omega \cdot 10^{-6} \varepsilon \quad . . . (66a)$$

und steht senkrecht zur Sternspannung \mathcal{E} (Fig. 45), bildet also mit E den Winkel $+120^\circ$ (und ist demnach gleichgerichtet mit der verketteten Spannung der zweiten Phase); auch hier ist J_c zugleich der den Leiter durchfließende Strom. Bei der zweiten Darstellung hingegen (Fig. 44) würde entsprechend der Dreieckschaltung der Kondensatoren der Ladestrom jedes Kondensators

$$J'_c = l C' \omega \cdot 10^{-6} E = \frac{1}{3} l C \omega \cdot 10^{-6} \mathcal{E} \sqrt{3} = \frac{J_c}{\sqrt{3}}$$

zu E senkrecht stehen, und der die Leitung durchfließende Strom würde sich wieder zu

$$\sqrt{3} \cdot J'_c = J_c$$

senkrecht zur Sternspannung \mathcal{E} ergeben.

Bei der hier angewendeten Definition der wirksamen Kapazität erhalten wir also, wie ich zusammenfassend nochmals hervorheben will, als Ladestrom der Grösse und Richtung nach stets unmittelbar die in der betrachteten

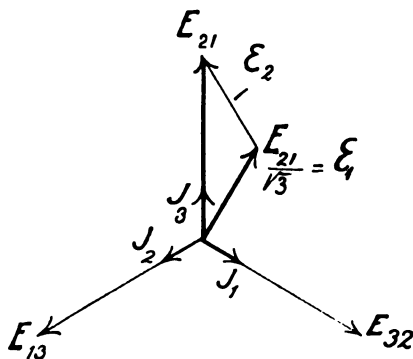


Fig. 45

Leitung fließende Stromkomponente. Daher ergibt der Leitungsstrom multipliziert mit der Leiterimpedanz stets der Grösse und Richtung nach den Spannungsabfall im einfachen Leiter.

Die Kapazitätsformeln für Wechsel- und Drehstromleiter erhalten daher die folgende Form:¹⁾

1. Für parallele Luftleiter, Zweileiter:

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{1}{2 \log \text{nat} \frac{D}{r}} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{20}} [\text{cm}^{-1} \text{sek}^2] \\ &= \frac{2.41 \cdot 10^{-6}}{\log \left(17.7 \cdot \frac{D}{r} \right)} \left[\frac{Mi}{m} \right] \end{aligned} \right\} \dots \dots (67)$$

¹⁾ GALILEO FERRARIS: Wissenschaftliche Grundlagen; und COHN: Das elektromagnetische Feld. Vgl. auch LEO LICHTENSTEIN: ETZ 1904, S. 106.

2. Für parallele Luftleiter, Drehstrom:

$$C = \frac{1}{2 \log \text{nat} \frac{D}{r}} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{20}} [\text{cm}^{-1} \text{sek}^2] \left. \vphantom{\frac{1}{2 \log \text{nat} \frac{D}{r}}} \right\} \dots \dots (68)$$

$$= \frac{2 \cdot 41 \cdot 10^{-5}}{\log \left(17 \cdot 7 \cdot \frac{D}{\sqrt{q}} \right)} \left[\frac{\text{Mi}}{\text{m}} \right]$$

3. Für Zweileiterkabel (Mantel geerdet):

$$C = \frac{\delta}{2 \log \text{nat} \left(\frac{2a}{r} \cdot \frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2} \right)} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{20}} [\text{cm}^{-1} \text{sek}^2] \left. \vphantom{\frac{\delta}{2 \log \text{nat} \left(\frac{2a}{r} \cdot \frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2} \right)}} \right\} \dots (69)$$

$$= \frac{2 \cdot 41 \delta \cdot 10^{-5}}{\log \left(\frac{2a}{r} \cdot \frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2} \right)} \left[\frac{\text{Mi}}{\text{m}} \right]$$

4. Für Drehstromkabel (Mantel geerdet):

$$C = \frac{\delta}{\log \text{nat} \left(\frac{3a^2}{r^2} \cdot \frac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 + a^6} \right)} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{20}} [\text{cm}^{-1} \text{sek}^2] \left. \vphantom{\frac{\delta}{\log \text{nat} \left(\frac{3a^2}{r^2} \cdot \frac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 + a^6} \right)}} \right\} \dots (70)$$

$$= \frac{4 \cdot 82 \delta \cdot 10^{-5}}{\log \left(\frac{3a^2}{r^2} \cdot \frac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 + a^6} \right)} \left[\frac{\text{Mi}}{\text{m}} \right]$$

Hierin bedeuten:

$C = \frac{Q}{\varepsilon} = \frac{\int J dt}{\varepsilon}$ die Kapazität eines Leiters für die Einheit der Kabellänge gegen den neutralen Punkt bzw. gegen Erde in den angegebenen Einheiten, falls ε die zwischen dem Leiter und dem neutralen Punkte bzw. Erde herrschende Spannung (das Potential des Leiters) ist.

$Q = \int J dt$ ist die auf jedem der Leiter befindliche Ladung, also wird der Ladestrom

$J = 10^{-6} l C \omega \cdot \varepsilon$ (J in Amp., wenn C in Mi, ε in Volt, l in m).

a den Abstand der Leiterachse von der Kabelachse [cm].

D den Abstand der beiden Leiterachsen voneinander [cm], also gleich $2a$ bei Zweileiterkabeln und gleich $a\sqrt{3}$ bei Drehstromkabeln.

q den Querschnitt der Leiter [mm²].

r den Halbmesser der Leiter [cm].

R den inneren Halbmesser des Mantels [cm].

δ die Dielektrizitätskonstante des Isoliermaterials.

Die Ableitung A einer Leitung ist übereinstimmend mit dem Vorhergehenden der reziproke Wert ihres Isolationswiderstandes für die Längeneinheit gegen Null bzw. gegen Erde. Ihre rechnerische Bestimmung in Kabeln stösst wegen der Inhomogenität aller unserer Isoliermaterialien auf unüberwindliche Schwierigkeiten, so dass ihre Ermittlung nur auf dem Wege der Messung möglich ist [55]. Bei homogenem Isoliermaterial würden die

Ist, wie in den meisten praktischen Fällen, lA zu vernachlässigen, so wird $y = b$.

Besitzt der Stromkreis sowohl Induktivität als Kapazität und Ableitung, so haben wir die folgenden beiden Fälle zu unterscheiden:

54.
Wirksame
Reaktanz
und
Suszeptanz.

1. L und C in Reihe (Fig. 47).

Die Impedanz des induktiven Teils ist

$$z_1 = n_1 + j l L \omega = n_1 + j x_1;$$

diejenige des Kondensators:

$$z_2 = \frac{1}{lA + j l C \omega \cdot 10^{-6}} = n_2 - j x_2,$$

wo gemäss Gleichung (55) [47]

$$n_2 = \frac{g_2}{y_2^2} = \frac{lA}{(lA)^2 + (lC\omega \cdot 10^{-6})^2}; \quad x_2 = \frac{lC\omega \cdot 10^{-6}}{(lA)^2 + (lC\omega \cdot 10^{-6})^2}.$$

Daher wird

$$z = z_1 + z_2 = n_1 + n_2 + j(x_1 - x_2) = n + jx. \quad (75)$$

Der wirksame Widerstand wird also:

$$n = n_1 + n_2 = n_1 + \frac{lA}{(lA)^2 + (lC\omega \cdot 10^{-6})^2} \quad (76)$$

und die wirksame Reaktanz:

$$x = x_1 - x_2 = lL\omega - \frac{lC\omega \cdot 10^{-6}}{(lA)^2 + (lC\omega \cdot 10^{-6})^2} \quad (77)$$

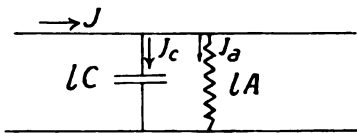


Fig. 46.

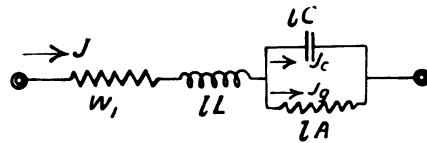


Fig. 47.

Der Spannungsabfall in dem Stromkreise ist daher:

$$\varepsilon = Jz = J(n + jx). \quad (78)$$

Die Phasenverschiebung $\varphi = \angle(\varepsilon, J)$ ergibt sich aus:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{n}. \quad (79)$$

Der Winkel φ ist positiv oder negativ zu nehmen, je nachdem die induktive oder Kapazitätsreaktanz überwiegt.

Wird $A = 0$, ist also keine Ableitung vorhanden, so wird:

$$x_2 = \frac{10^6}{lC\omega}; \quad n_2 = 0; \quad |z_2| = -jx_2,$$

daher:

$$n = n_1; \quad x = x_1 - x_2 = lL\omega - \frac{10^6}{lC\omega}. \quad (80)$$

Die graphische Darstellung würde folgende Konstruktion ergeben:

In dem Stromkreise des Kondensators zerfällt J in die beiden rechtwinklig zu einander stehenden Stromvektoren J_c und J_g (Fig. 48), die infolge der beiden Gleichungen:

$$\frac{J_c}{J_g} = \frac{lC\omega \cdot 10^{-6}}{lA} = \operatorname{tg} \varphi_2$$

$$J_c^2 + J_g^2 = J^2$$

sich berechnen zu:

$$J_c = J \frac{lC\omega}{y_2} 10^{-6}$$

$$J_g = J \frac{lA}{y_2}.$$

Daher wird der Spannungsabfall im Kondensatorkreise:

$$\varepsilon_2 = \frac{J_g}{lA} = \frac{J_c \cdot 10^6}{lC\omega} = \frac{J}{y_2}$$

und liegt in der Richtung von J_g bzw. senkrecht zu J_c .

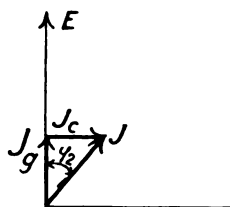


Fig. 48.

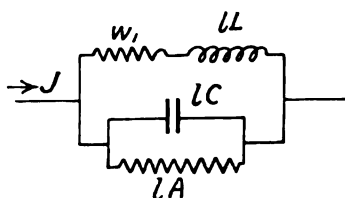


Fig. 50.

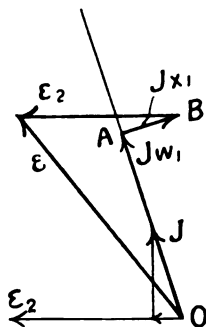


Fig. 49.

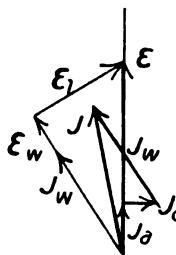


Fig. 51.

Wir zerlegen demnach (Fig. 49) J in die beiden Komponenten J_c und J_g und bilden $\varepsilon_2 = \frac{J_g}{lC\omega} 10^6$ in der Richtung von J_g . In der Richtung von J tragen wir nun $Jw_1 = OA$, senkrecht dazu in der Richtung der Voreilung $Jx_1 = AB$ auf und ziehen BC parallel und gleich $O\varepsilon_2$, dann ist $O\varepsilon = \varepsilon$ der Spannungsabfall in der Leitung.

2. L und C in Parallelschaltung (Fig. 50).

Hier ist nach Gleichung (55) [47]:

$$y_1 = \frac{1}{n_1 + j l L \omega} = g_1 - j b_1,$$

wo

$$g_1 = \frac{n_1}{z_1^2}; \quad b_1 = \frac{l L \omega}{z_1^2}; \quad z_1 = \sqrt{n_1^2 + (l L \omega)^2}$$

$$y_2 = l A + j l C \omega \cdot 10^{-6},$$

also ist

$$y = y_1 + y_2 = g_1 + l A + j (10^{-6} l C \omega - b_1) = g + j b. \quad (81)$$

die wirksame Admittanz und

$$g = g_1 + l A = \frac{n_1}{n_1^2 + (l L \omega)^2} + l A. \quad (82)$$

die wirksame Konduktanz,

$$b = 10^{-6} l C \omega - b_1 = 10^{-6} l C \omega - \frac{l L \omega}{n_1^2 + (l L \omega)^2}. \quad (83)$$

die wirksame Suszeptanz. Die Phasenverschiebung $\varphi = \angle(\mathcal{E} J)$ ergibt sich aus $\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}$ und ist positiv oder negativ, je nachdem $b \gtrless 0$.

Bei gegebener Spannung \mathcal{E} berechnet sich der Gesamtstrom zu

$$J = \mathcal{E} y = \mathcal{E} (g + j b); \quad (84)$$

der den induktiven Widerstand durchfließende Strom wird:

$$J_w = \mathcal{E} y_1 = \mathcal{E} (g_1 - j b_1); \quad \operatorname{tg} \varphi_w = \frac{b_1}{g_1}. \quad (85)$$

der unverzweigte Strom des Kondensatorkreises ist

$$J_{ca} = \mathcal{E} y_2 = \mathcal{E} (l A + j l C \omega \cdot 10^{-6}); \quad \operatorname{tg} \varphi_{ca} = \frac{C \omega}{A} \cdot 10^{-6} \quad (86)$$

und dessen Komponenten:

$$J_c = \mathcal{E} l C \omega \cdot 10^{-6}; \quad \varphi_c = 90^\circ \quad (87)$$

$$J_a = \mathcal{E} l A; \quad \varphi_a = 0 \quad (88)$$

Soll dagegen bei bekanntem J der Spannungsabfall in dem Stromkreise ermitteln werden, so berechnen sich zunächst der wirksame Widerstand, die Reaktanz und Impedanz zu:

$$w = \frac{g}{y^2}; \quad x = \frac{b}{y^2}; \quad z = \sqrt{w^2 + x^2} = \frac{1}{y} \quad (89)$$

und daraus der Spannungsabfall zu

$$\mathcal{E} = J z. \quad (90)$$

Wird wieder $A = 0$, so vereinfacht sich die Gleichung (81) zu

$$y = g_1 + j(lC\omega \cdot 10^{-6} - b_1) \quad . \quad . \quad . \quad (81a)$$

Die graphische Konstruktion des Gesamtstromes J bei gegebenem \mathcal{E} ist ganz analog der im Fall 1 dieses Abschnitts behandelten Darstellung des Spannungsabfalls bei Reihenschaltung, man hat nur die Ströme und Spannungen miteinander zu vertauschen:

Die Spannung \mathcal{E} zerfällt im induktiven Stromkreise in zwei Komponenten

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{E} \frac{w_1}{z_1} \quad \text{und} \quad \mathcal{E}_l = \mathcal{E} \frac{lL\omega}{z_1}$$

(Fig. 51), und der Strom $J_r = \frac{\mathcal{E}}{z_1}$ hat die Richtung von \mathcal{E}_r . Man trägt demnach $J_a = \mathcal{E}lA$ in der Richtung von \mathcal{E} und senkrecht dazu in der Richtung der Voreilung $J_r = \mathcal{E}lC\omega \cdot 10^{-6}$ auf und addiert dazu J_r . Die Resultierende ist J .

55.
Messung der
Leitungs-
konstanten.

Denken wir uns einen ideellen Leiter, d. h. einen einfachen horizontal ausgespannten Draht (Fig. 52), der die von dem Generator erzeugte Leistung

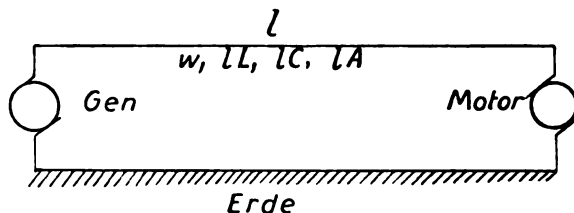


Fig. 52.

zum Verbraucher, z. B. einem Motor hinleitet, so zwar, dass alle durch die Leitung verursachten Verluste ausschliesslich durch ihn bestritten werden. Als Rückleitung sei also eine widerstandslose, kapazitäts- und induktionsfreie Leitung (ideale Erde) angenommen. Die Länge des Leiters sei l [m], sein Widerstand w [Ω], also $\frac{w}{l}$ der Widerstand für 1 m Länge, seine Induktivität L [Henry m^{-1}], seine Kapazität C [Mi m^{-1}] und seine Ableitung A [$\Omega^{-1} m^{-1}$]. In dem Felde des Leiters sollen weder ferromagnetische Körper noch andere Leiter vorhanden sein; dielektrische Hysteresisarbeit sei nicht zu leisten. Sind dann \mathcal{E}_0 und J_0 die (sinusförmige) Spannung und der Strom des Generators, \mathcal{E}_1 und J_1 die entsprechenden Grössen des Motors und \mathcal{E} und J diejenigen in irgend einem Punkte des Leiters, $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_1$ der Spannungsabfall in dem Leiter, so gelten ganz allgemein die folgenden beiden Gleichungen:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} &= J \frac{w}{l} + L \frac{\partial J}{\partial t} \\ -\frac{\partial J}{\partial x} &= \mathcal{E} A + 10^{-6} C \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad (91)$$

die den Verlauf von Spannung und Strom in jedem Punkte der Leitung und

in jedem Augenblick vollständig bestimmen. Für $A = 0$ folgt aus diesen Gleichungen das erweiterte OHMSche Gesetz:

$$\mathcal{E} = Jn + L \frac{dJ}{dt} + \frac{10^9}{C} \int J dt.$$

Es ist bereits erwähnt [49], dass die Gleichungen für die Strom- und Spannungsverteilung symmetrisch belasteter Wechselstrom- und Drehstromleitungen die gleiche Form besitzen, und dass wir daher diese Leitungen ganz wie ideelle Leiter behandeln und die für diese ermittelten Ergebnisse auf sie anwenden dürfen.

Die Gleichungen (91) führen uns nun auf eine einfache Messmethode für die Leitungskonstanten.¹⁾ $-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x}$ ist der Spannungsabfall für die Längeneinheit und $-\frac{\partial J}{\partial x}$ der in jeder Längeneinheit infolge Ableitung und Kondensatorladung nach der Rückleitung übergehende Strom. Wir erhalten also durch Integration über die ganze Länge als Spannungsabfall der ideellen Leitung für den Sonderfall, dass $\frac{\partial J}{\partial x} = 0$ ist:

$$\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_1 = Jn + lL \frac{\partial J}{\partial t} = Jn + j l L \omega J \quad . \quad . \quad (92)$$

und als Stromabfall für den Sonderfall, dass $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} = 0$ ist:

$$J_0 - J_1 = \Delta J = \mathcal{E} l A + 10^{-9} l C \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \mathcal{E} l A + 10^{-9} j l C \omega \mathcal{E} \quad . \quad (93)$$

Wir können daher durch folgende drei Messungen die charakteristischen Konstanten der Leitung experimentell bestimmen:

1. Durch eine Kurzschlussmessung mittels Wechsel- bzw. Drehstrom den wirksamen Widerstand n und die induktive Reaktanz $x = lL\omega$, entsprechend Gleichung (105), da in diesem Falle wegen der geringen Spannung, die nötig ist, um die normale Betriebsstromstärke J zu erzeugen, sowohl C als A und daher auch ΔJ verschwinden. Ist also E_k diejenige Spannung (bei Drehstrom demnach die verkettete Spannung), die den Strom J hervorbringt, $\cos \varphi_k$ der Leistungsfaktor, so ist bei Wechselstrom (Fig. 53), wenn, wie gewöhnlich, ϵ den Spannungsabfall in einem (einfachen) Leiter, n dessen Widerstand und l seine Länge bezeichnen:

$$E_k = 2 \epsilon,$$

also:

$$n = \frac{1}{2} \frac{E_k \cos \varphi_k}{J} = \frac{\epsilon \cos \varphi_k}{J}$$

$$lL\omega = \frac{1}{2} \frac{E_k \sin \varphi_k}{J} = \frac{\epsilon \sin \varphi_k}{J}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{lL\omega}{n}.$$

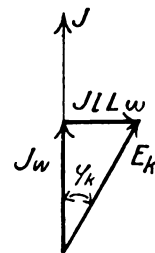


Fig. 53.

1) Siehe LEO LICHTENSTEIN: Z. f. E. 1904, S. 443.

Für Drehstrom wird (Fig. 54):

$$\begin{aligned} E_{21} &= E_{13} = E_{32} = E_k \\ \varepsilon_1 &= \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} E_k. \\ J_1 &= J_2 = J_3 = J. \end{aligned}$$

Da die gesamte Leistung des Drehstromsystems

$$\sqrt{3} E_k J \cos \varphi_k = 3 \varepsilon J \cos \varphi_k = 3 J^2 n$$

ist, so wird

$$\begin{aligned} n &= \frac{E_k \cos \varphi_k}{\sqrt{3} J} = \frac{\varepsilon \cos \varphi_k}{J} \\ l L \omega &= \frac{E_k \sin \varphi_k}{\sqrt{3} J} = \frac{\varepsilon \sin \varphi_k}{J} \\ \operatorname{tg} \varphi_k &= \frac{l L \omega}{n}. \end{aligned}$$

φ_k bedeutet den Winkel zwischen J und $E/\sqrt{3}$, also $\angle (J, \varepsilon)$.

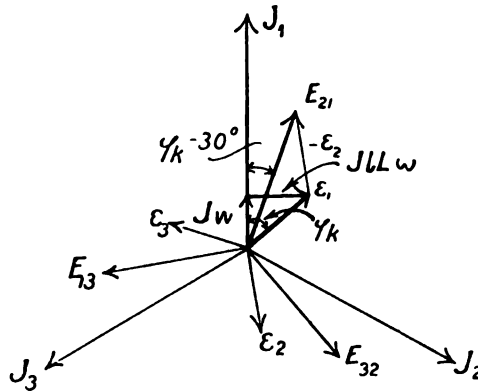


Fig. 54.

Umgekehrt ist der Spannungsabfall in einem Drehstromleiter bei einer Belastung mit J Amp., wenn nur Widerstand und Induktivität vorhanden sind:

$$\varepsilon = J (n + j l L \omega) = J z$$

und folglich der gesamte Spannungsabfall am Ende der Leitung:

$$E_k = \sqrt{3} \varepsilon = \sqrt{3} \cdot J (n + j l L \omega) = \sqrt{3} J z,$$

wobei der Winkel $\arctg \frac{l L \omega}{n}$ die Phasenverschiebung zwischen $J/\sqrt{3}$ und E_k , d. h. den Winkel (J, ε) darstellt.

2. Durch eine Leerlaufmessung bei mässiger Spannung die Kapazitätssuszeptanz $10^{-6} l C \omega$ gemäss Gleichung (93), da nunmehr infolge der geringen Ladungsstromstärke einerseits die Wirkung der Induktivität vernachlässigbar klein wird, andererseits wegen der geringen Spannung die Ableitung A

nicht in Frage kommt. Gemessen wird also der Strom J_c und die Spannung E . Bei Wechselstrom-Zweileitern ist der gesamte Ladestrom gemäss Gleichung (65 a)

$$J_c = 10^{-6} l C \omega \frac{E}{2},$$

und bei Drehstrom nach Gleichung (66 a)

$$J_c = 10^{-6} l C \omega \frac{E}{\sqrt{3}},$$

wo entsprechend der Messanordnung E die verkettete Spannung, J_c der (unverkettete) Leitungsstrom ist. Vorausgesetzt ist hierbei, dass die Spannung E und damit auch die Phasenverschiebung (bei Wechselstrom $\angle(JE) = \angle(J\varepsilon) = 90^\circ$, bei Drehstrom $\angle(J\varepsilon) = 90^\circ$, also $\angle(JE) = 120^\circ$) längs der ganzen

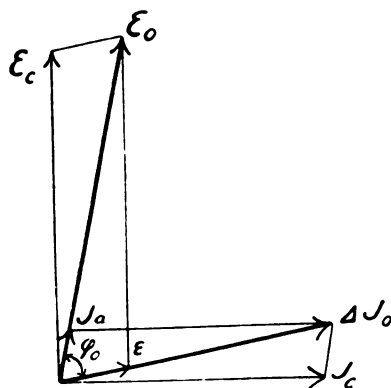


Fig. 55.

Leitung konstant sind, dass also der durch den Strom J_c hervorgerufene Spannungsabfall in den Leitern gegen E nicht in Frage kommt. Daher berechnet sich aus den Daten der Messung die Kapazität für die Längeneinheit des Drahtes zu:

$$C = \frac{Q}{E/2} = 2 \frac{10^6}{l\omega} \frac{J_c}{E} \left[\frac{Mi}{m} \right] \text{ bei Wechselstrom}$$

und

$$C = \frac{Q}{E/\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot \frac{10^6}{l\omega} \frac{J_c}{E} \left[\frac{Mi}{m} \right] \text{ bei Drehstrom.}$$

3. Die dritte Messung, gleichfalls eine Leerlaufmessung, aber bei der normalen Hochspannung, ergibt ausser der wirksamen Kapazität C noch die Ableitung für die Längeneinheit A . Beobachtet werden AJ_0 , E_0 und $\cos \varphi_0$, der stets sehr nahe gleich Null sein wird, da φ_0 wenig von 90° abweicht. Von der Spannung E_0 (bei Wechselstrom $= \frac{1}{2} E_0$, bei Drehstrom $= \frac{1}{\sqrt{3}} E_0$) ist abzuziehen (Fig. 55) der durch den Strom AJ_0 hervorgerufene Spannungsabfall, der wegen der vorausgesetzten grösseren Bedeutung von J_c und J_a nicht mehr zu vernachlässigen ist, also

$$\varepsilon = \frac{1}{2} n AJ_0,$$

der die Richtung von ΔJ_0 besitzt. Der Faktor $\frac{1}{2}$ ist zu der bekannten Formel für ε hinzugefügt worden, weil bei der verteilten Kapazität und Ableitung der Strom von ΔJ_0 am Anfang des Leiters bis Null am Ende desselben abnimmt, also den gleichen Spannungsverlust hervorbringt, als wenn er in voller Grösse auf der Hälfte der Länge abgenommen würde. Die sich aus dieser Konstruktion ergebende Spannung \mathcal{E}_c ist die mittlere Ladespannung, zu welcher der Ladestrom J_c senkrecht steht (in der Richtung der Voreilung). Die Grössen J_c und J_a werden erhalten, indem durch den Endpunkt von ΔJ_0 Parallelen zu \mathcal{E}_0 und J_0 gelegt werden. Dann ist für Wechselstrom nach Gleichung (65 a) und (71):

$$J_c = 10^{-9} l C \omega \mathcal{E}, \text{ also } C = 2 \frac{10^9}{l \omega} \frac{J_c}{\mathcal{E}_c}$$

$$J_a = l A \mathcal{E}, \text{ also } A = \frac{2}{l} \frac{J_a}{\mathcal{E}_c}$$

und für Drehstrom nach Gleichung (66 a) und (71):

$$J_c = 10^{-9} l C \omega \mathcal{E}_c, \text{ also } C = \sqrt{3} \frac{10^9}{l \omega} \frac{J_c}{\mathcal{E}_c}$$

$$J_a = l A \mathcal{E}_c, \text{ also } A = \frac{\sqrt{3}}{l} \frac{J_a}{\mathcal{E}_c}$$

Offensichtlich entspricht diese Darstellung der Kapazität und Ableitung nur angenähert den wirklichen Verhältnissen, indem anstatt der über die ganze Länge verteilten Grössen eine in der Mitte des Leiters angebrachte äquivalente Kapazität und Ableitung angenommen wurde. Die Betrachtung der verteilten Kapazität und Ableitung würde entsprechend den Gleichungen (91) an jeder Stelle des Kabels eine andere Spannung und einen anderen Strom zu berechnen gestatten, deren graphische Darstellung eine stetige Kurve für jede der beiden Grössen ergeben würde.¹⁾

56.
Strom- und
Spannungs-
verteilung
bei Wechsel-
strom.

Wie bereits erwähnt [49], führt die Aufstellung der Gleichungen für die Strom- und Spannungsverteilung symmetrisch belasteter Wechsel- und Drehstromleitungen auf Formeln, die den für die ideelle Leitung gültigen analog gebaut sind, so dass wir in diesen Fällen die einzelnen Leiter ganz wie ideelle Leiter behandeln können. Ehe wir jedoch auf die Strom- und Spannungsverteilung in solchen mit Induktivität, Kapazität und Ableitung behafteten Kabeln eingehen, soll der einfachere Fall der nur Widerstand bietenden Leitung betrachtet werden.

57.
Fortsetzung.
Leiter ohne
Reaktanz.

Ebenso wie bei Gleichstrom die Nutzwiderstände, können wir bei Wechselstrom die Nutzimpedanzen durch die diesen entsprechenden Spannungen bei Reihenschaltung bzw. Ströme bei Parallelschaltung ersetzen, nur müssen wir entsprechend den beiden Bestandteilen der Impedanzen entweder die beiden Komponenten des Spannungs- bzw. Stromvektors, also die energieverzehrende und die energielose Komponente angeben, oder — wie es in der Praxis geschieht — den Phasenverschiebungswinkel bzw. seinen Cosinus, den sogenannten Leistungsfaktor. Auch hier deuten wir die Phasen-Voreilung

1) Diese graphische Konstruktion siehe bei GALILEO FERRARIS: Wissenschaftliche Grundlagen S. 279 ff. oder bei HERZOG-FELDMANN: Die Berechnung elektrischer Leitungen, Bd. I, S. 310 ff.

oder Nacheilung des die Nutzlast vertretenden (Spannungs- oder Strom-) Vektors gegenüber dem gemeinsamen (Strom- bzw. Spannungs-)Vektor durch Hinzufügung des ersten bzw. vierten Quadrant an, so dass also $\varepsilon [37^\circ$ bzw. $\varepsilon [0.80$ bei Reihenschaltung eine Voreilung der Netzspannung um 37° bzw. einen voreilenden Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0.80$ bedeutet, und entsprechend bei Parallelschaltung $J [37^\circ]$ bzw. $J [0.80]$ eine Nacheilung des Stromes gegen die gemeinsame Spannung um den gleichen Winkel. In beiden Fällen ist also eine induktive Belastung vorausgesetzt worden; bei Kapazitätsbelastung würden sich die Phasenbezeichnungen umkehren.

Die Strom- und Spannungsverteilung in der Leitung wird nun ermittelt, indem die Teilspannungen, also Spannungsabfall und Nutzspannung, ebenso wie die Teilströme vektoriell zu einander addiert werden. Dabei zeigt es sich nun sofort, dass der Spannungsabfall in dem Leiter in Wechselstromkreisen nicht mehr mit dem Spannungsverlust, d. h. dem Spannungsunterschied zwischen zwei Punkten $\Delta \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ (Fig. 56), zusammenfällt, wenn der Strom eine Phasenverschiebung gegen die Spannung besitzt. Nur in Stromkreisen ohne Phasenverschiebung ist $\Delta \varepsilon = \varepsilon$. Für das Funktionieren der Stromverbraucher ist natürlich die Änderung der absoluten Grösse der Spannung, also der Spannungsverlust $\Delta \varepsilon$ massgebend. Da diese Grösse stets nur einige Prozent von ε beträgt, so ist sehr nahe $0 \varepsilon_2$ gleich seiner rechtwinkligen Projektion auf ε_1 (Fig. 56) und folglich sehr nahe

$$\Delta \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{1,2} \cos \varphi,$$

wenn

$$\varphi = \angle (\varepsilon_2 J) \div \angle (\varepsilon_1 J)$$

die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bedeutet. Wir definieren daher für Wechselstromkreise den Spannungsverlust als die energieverzehrende Komponente des Spannungsabfalls, also

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon \cos (\varepsilon \varepsilon) = \varepsilon_{re} \dots \dots \dots (94)$$

Umgekehrt folgt daraus, dass der Spannungsabfall ε in einem Wechselstromleiter im Verhältnis $\frac{1}{\cos (\varepsilon \varepsilon)}$ grösser sein darf als der zulässige Spannungsverlust.

Die nachstehenden, auf Einphasen-Wechselstrom bezüglichen Entwicklungen gelten zugleich für Drehstromleitungen, nur wird der gesamte, auf E bezügliche Spannungsabfall, der bei Wechselstrom gleich 2ε ist, bei Drehstrom gleich $\varepsilon \sqrt{3}$. Ferner hat man bei Drehstrom unter i_r stets den Abzweigstrom zu verstehen, der dem auf Stern geschalteten Stromabnehmer entspricht, d. h. wenn i_Δ den Strom eines auf Dreieck geschalteten Abnehmers bedeutet, ist

$$i_r = \sqrt{3} i_\Delta;$$

dementsprechend sind auch die Phasenwinkel stets auf die Sternspannung ε zu beziehen.

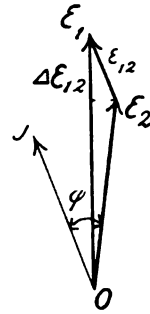


Fig. 56.

Wir setzen nunmehr eine Parallelschaltungsanlage nach Fig. 57 voraus mit den Abzweigungen $i_1 \varphi_1$, $i_2 \varphi_2$ und $i_3 \varphi_3$, wo

$$\varphi_r = \angle (\mathcal{E}_r i_r).$$

Dann wird, wenn \mathcal{E}_3 die Spannung im Punkte 3 ist (Fig. 58)

$$J_{23} = i_3, \quad \mathcal{E}_{23} = J_{23} w_{23} \quad \text{und} \quad \varphi_{23} = \varphi_3;$$

$$J_{12} = i_2 + i_3, \quad \mathcal{E}_{12} = J_{12} w_{12}$$

und schliesslich

$$J_{01} = i_1 + i_2 + i_3, \quad \mathcal{E}_{01} = J_{01} w_{01};$$

ferner (Fig. 59)

$$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_{23}, \quad \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_{12}, \quad \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_{01}.$$

φ_{12} und φ_{01} sind von φ_2 und φ_1 verschieden, dagegen können behufs Vereinfachung der Konstruktion die Winkel $(\mathcal{E}_3 i_3)$, $(\mathcal{E}_2 i_2)$ und $(\mathcal{E}_1 i_1)$ unbedenk-

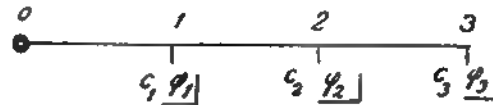


Fig. 57.

\mathcal{E}

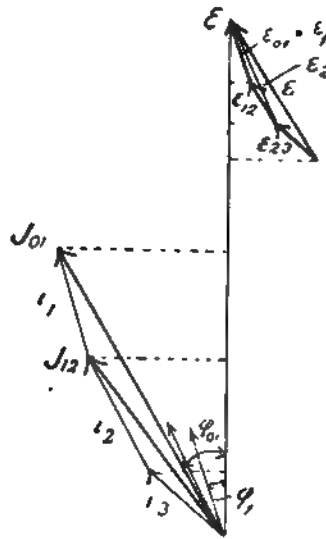


Fig. 58.

J_{01}

Fig. 59.

lich den Winkeln $(\mathcal{E}_3 i_3)$, $(\mathcal{E}_2 i_2)$ und $(\mathcal{E}_1 i_1)$ gleich gesetzt werden, da wegen der geringen Grösse der ϵ der Unterschied der entsprechenden Cosinus in den Grenzen der Genauigkeit, die wir aus den mehrfach erwähnten Gründen anstreben, vernachlässigt werden kann.

Es ist also, wie früher [37]:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_{r-1,r} &= J_{r-1,r} w_{r-1,r} \\ \mathcal{E}_r &= \sum_1^n \mathcal{E}_{r-1,r} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (95)$$

Um nun von den Vektorgleichungen zu arithmetischen Gleichungen zu gelangen, zerlegen wir die Ströme und Spannungsabfälle in ihre Komponenten parallel und senkrecht zu \mathcal{E} und erhalten (Fig. 59):

$$\left. \begin{aligned} J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} &= \sum_1^n i_v \cos \varphi_v \\ J_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v} &= \sum_1^n i_v \sin \varphi_v \\ \operatorname{tg} \varphi_{v-1,v} &= \frac{\sum_1^n i_v \sin \varphi_v}{\sum_1^n i_v \cos \varphi_v} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (96)$$

ferner:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} &= n_{v-1,v} J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} \\ \varepsilon_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v} &= n_{v-1,v} J_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v} \end{aligned} \right\} \dots \dots (97)$$

mithin:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_v \cos (\mathcal{E} \varepsilon_v) &= \varepsilon_{v,w} = \sum_1^v \varepsilon_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} = \sum_1^v n_{v-1,v} J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} \\ \varepsilon_v \sin (\mathcal{E} \varepsilon_v) &= \varepsilon_{v,l} = \sum_1^v \varepsilon_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v} = \sum_1^v n_{v-1,v} J_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v} \\ \varepsilon_v &= \sqrt{\varepsilon_{v,w}^2 + \varepsilon_{v,l}^2} \\ \operatorname{tg} (\mathcal{E} \varepsilon_v) &= \frac{\sum_1^v n_{v-1,v} J_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v}}{\sum_1^v n_{v-1,v} J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v}} \end{aligned} \right\} \text{(XIIIa)}$$

Im besonderen ist der maximale Spannungsabfall:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \sqrt{\varepsilon_w^2 + \varepsilon_l^2} \\ \varepsilon_w &= \sum_1^n n_{v-1,v} J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} \\ \varepsilon_l &= \sum_1^n n_{v-1,v} J_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v} \\ \operatorname{tg} (\mathcal{E} \varepsilon) &= \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_w} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{(XIII)}$$

Mittels ähnlichen Umformungen, wie in [37] erhält man aus den letzten Gleichungen auch die folgenden:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_w &= \sum_1^n n_v i_v \cos \varphi_v \\ \varepsilon_l &= \sum_1^n n_v i_v \sin \varphi_v \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{(XIV)}$$

Wir sehen also, dass die phasenverschobenen Wechselströme in zwei getrennte Stromverteilungen aufgelöst werden können, von denen die eine in der Richtung der Spannung, die andere senkrecht dazu liegt. Jede dieser

Belastungen bringt unabhängig von der anderen phasengleiche Spannungsverluste hervor, die sich vektoriell superponieren.¹⁾

58.
Quer-
schnitts-
berechnung
bei Leitern
ohne
Reaktanz.

Bezüglich der Berechnung der Querschnitte $q_{v-1,v}$ aus den Gleichungen (97) bis (XIV) gelten die gleichen Überlegungen, wie die in den Abschnitten [37] ff. ausgeführten, und zwar folgt für konstanten Querschnitt, wenn ϵ_w der maximal zulässige Spannungsverlust, der in einem Leiter auftretende Spannungsabfall also $\epsilon = \frac{\epsilon_w}{\cos(\epsilon_t)}$ gesetzt wird:

$$q = \frac{\rho}{\epsilon_w} \sum_1^n l_v i_v \cos \varphi_v = \frac{\rho}{\epsilon_w} \sum_1^n l_{v-1,v} J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} \quad (XV)$$

Also der konstante Querschnitt wird nur durch die energieverzehrenden Komponenten der Ströme und Spannungsabfälle in den Leitungen bestimmt, so lange die Feuersicherheit, für welche natürlich die vollen Stromstärken in Betracht kommen, nicht grössere Querschnitte nötig macht.

In ähnlicher Weise wird für konstante Stromdichte der Querschnitt erhalten zu:

$$q_{v-1,v} = \frac{J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v}}{j_w} = \frac{\rho}{\epsilon_w} l_n J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} \quad (XVI)$$

wenn

$$j_w = \frac{J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v}}{q_{v-1,v}} = \frac{\epsilon_w}{\rho l_n} \quad (XVII)$$

die energieverzehrende Komponente der konstanten Stromdichte bedeutet. Ferner erhält man den auf Grund des geringsten Kupfervolumens berechneten Querschnitt als

$$q_{v-1,v} = \left(\frac{\rho}{\epsilon_w} \sum_1^n l_{v-1,v} J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v} \right) \sqrt{J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v}} \quad (XVIII)$$

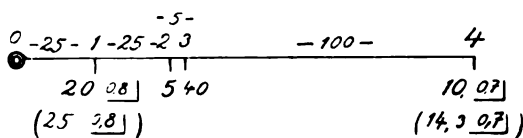


Fig. 60.

Beispiel.

Wir legen der Rechnung ein ähnliches Beispiel zu Grunde, wie das früher auf S. 42 behandelte, und zwar soll die Leitung auf konstanten Querschnitt berechnet werden. Es ist also $E = 120$ Volt und $2 \epsilon_w = 0.02 E = 2.4$ Volt. Die bei 1 und 4 abgezweigten Ströme (Fig. 60) sollen eine Phasennachteilung von 37° bzw. 46° besitzen. Dann ist:

$$\begin{aligned} \sum_1^n l_v i_v \cos \varphi_v &= 25 \cdot 20 \cdot 0.8 = 400 \\ &+ 50 \cdot 5 \cdot 1 = 250 \\ &+ 55 \cdot 40 \cdot 1 = 2200 \\ &+ 155 \cdot 10 \cdot 0.7 = 1085 \\ &\hline &3935 \end{aligned}$$

1) HERZOG-FELDMANN, Über Stromverteilung in Wechselstromnetzen, ETZ 1899. S. 780.

also wird

$$q = \frac{0.018}{12} \cdot 3935 = 59.0 \text{ mm}^2,$$

d. h. um etwa 12% kleiner als der auf S. 44 berechnete Querschnitt. Dies hat seinen Grund darin, dass infolge der Phasenverschiebung der bei 1 und 4 abgezweigten Ströme die Leitung hier weniger Energie führt als früher. Soll dagegen die Leitung die gleiche Energie führen, so müssten im Punkte 1 $i_1 = \frac{20}{0.8} = 25$ und im Punkte 4 $i_4 = \frac{10}{0.7} = 14.3$ Amp. (die eingeklammerten Werte der Figur) abgezweigt werden. Dann wird der gleiche Querschnitt wie bei dem Beispiel auf S. 44 erhalten, nämlich 67.5 mm².

Wäre umgekehrt für den letzten Fall die Leitung mit dem Querschnitt 67.5 auf Spannungsverlust zu kontrollieren, so wäre:

v	$i_v \cos \varphi_v$	$J_{v-1,v} \cos \varphi_{v-1,v}$	$i_v \sin \varphi_v$	$J_{v-1,v} \sin \varphi_{v-1,v}$
1	20	$75 \cdot 25 = 1875$	15	$25.2 \cdot 25 = 630$
2	5	$55 \cdot 25 = 1375$	0	$10.2 \cdot 25 = 255$
3	40	$50 \cdot 5 = 250$	0	$10.2 \cdot 5 = 51$
4	10	$10 \cdot 100 = 1000$	10.2	$10.2 \cdot 100 = 1020$
		<u>4500</u>		<u>1956</u>

Daher wird

$$\varepsilon_w = \frac{0.018}{67.5} \cdot 4500 = 1.2; \varepsilon_l = \frac{0.018}{67.5} \cdot 1956 = 0.52; \varepsilon = 1.31.$$

Ferner ist nach Fig. 59 $\varepsilon^2 = (\varepsilon_4 + \varepsilon_w)^2 + \varepsilon_l^2 = 61.2^2 + 0.52^2$, also $\varepsilon = 61.2$, wenn $\varepsilon_4 = 60$ gesetzt wird. Daher wird $\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_4 = 1.2 = 0.02 \varepsilon$.

Die allgemeinen Gleichungen (91) [55] für Leitungen mit verteilter Kapazität und Induktivität haben als Lösungen sehr komplizierte Ausdrücke¹⁾ (s. weiter unten), die sich zur praktischen Rechnung nicht eignen. Eine wesentliche Vereinfachung der Lösungen erzielt man jedoch, wenn man die verteilte Kapazität, Ableitung und Induktivität durch die entsprechenden an einer Stelle konzentrierten äquivalenten Grössen ersetzt und die übrige Leitung als kapazitäts- und induktionsfrei behandelt. Als die grösste Leitungslänge, für die diese Vereinfachung gestattet ist, ohne dass sich die neuen Verhältnisse von den tatsächlichen bei verteiltem L , C und A zu sehr entfernen, gilt $\frac{1}{16}$ der elektrischen Wellenlänge λ . Diese ergibt sich aus der Gleichung

$$\lambda = \frac{2\pi}{a}$$

wo

$$a^2 = \frac{1}{2} \sqrt{[n^2 + (lL\omega)^2] [(lA)^2 + (lC\omega 10^{-9})^2]} + \frac{1}{2} (l^2 LC\omega^2 10^{-9} - lAn)$$

oder wenn $A = 0$ und n klein gegen $lL\omega$

$$a = l\omega \sqrt{LC 10^{-9}}.$$

59.
Strom- und
Spannungs-
verteilung
bei Leitern
mit
Reaktanz.

1) AD. FRANKE, Die elektrischen Vorgänge in Fernspreitleitungen und Apparaten, ETZ 1891, S. 447, sowie auch die Arbeiten von BREISIG, ETZ 1895, S. 164; 1899, S. 192; 1900, S. 87; KENNELLY, El. World 1894, Bd. 23, S. 17; HERZOG-FELDMANN, Elektrische Leitungsnetze.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung ist dann

$$v = \lambda p = \frac{\omega}{\alpha}$$

oder für $A = 0$, n klein gegen $lL\omega$

$$v = \frac{1}{l \sqrt{LC 10^{-9}}}.$$

Da nun λ unter den praktischen Verhältnissen, d. h. bei Kupferfreileitungen von 4 bis etwa 10 mm, die 50 bis 200 cm voneinander entfernt sind, und bei Frequenzen unter 100, stets grösser als 1600 km ist, so ist also die oben erwähnte grösste der Vereinfachung zugängliche Leitungslänge etwa 100 km. Bei noch längeren Leitungen verfährt man, gleichfalls mit ausreichender Genauigkeit, in der Weise, dass man etwa alle 100 km die entsprechende, die verteilten Grössen ersetzende Kapazität und Ableitung in Parallelschaltung, den Widerstand und die Induktivität in Reihenschaltung anbringt.

Die Lösung¹⁾ der beiden Gleichungen (91) sind nach OLIVER HEAVISIDE:

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \xi \cos \text{hyp} \sqrt{Z Y_c} + J \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin \text{hyp} \sqrt{Z Y_c} \\ &= \xi \cos j \sqrt{Z Y_c} + J \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin j \sqrt{Z Y_c} \\ J_0 &= J \cos \text{hyp} \sqrt{Z Y_c} + \xi \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin \text{hyp} \sqrt{Z Y_c} \\ &= J \cos j \sqrt{Z Y_c} + \xi \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin j \sqrt{Z Y_c} \end{aligned}$$

wo $Z = n + j l L \omega$ die Impedanz des Leiters von der Länge l und $Y_c = lA + j l C \omega^{-1}$ die Suszeptanz des dem Leiter äquivalenten Kondensators, ξ_0 und J_0 Spannung (gegen Null) und Strom am Anfang, ξ und J die entsprechenden Grössen am Ende der Linie bezeichnen. Ferner ist $j = \sqrt{-1}$.

Die hyperbolischen Funktionen lassen sich nun in Reihen entwickeln und geben dann:

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \xi \left(1 + \frac{Z Y_c}{2!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{4!} + \dots \right) + J Z \left(1 + \frac{Z Y_c}{3!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{5!} + \dots \right) \\ J_0 &= J \left(1 + \frac{Z Y_c}{2!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{4!} + \dots \right) + \xi Y_c \left(1 + \frac{Z Y_c}{3!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{5!} + \dots \right) \end{aligned}$$

Man erhält daher in erster Annäherung die bereits im Abschnitt [55] abgeleiteten Lösungen:

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \xi + J Z \\ J_0 &= J + \xi Y_c \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (98)$$

und als zweite Annäherung, wenn $\frac{Z Y_c}{2}$ und $\frac{Z Y_c}{6}$ nicht mehr gegen 1 vernachlässigt werden dürfen:

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \xi \left(1 + \frac{Z Y_c}{2} \right) + J Z \left(1 + \frac{Z Y_c}{6} \right) \\ J_0 &= J \left(1 + \frac{Z Y_c}{2} \right) + \xi Y_c \left(1 + \frac{Z Y_c}{6} \right) \end{aligned} \quad \dots \dots (99)$$

1) S. HERZOG-FELDMANN, Elektrische Leitungsnetze, Bd. 2, S. 365.

Von den beiden Gleichungen (98) giebt die erste bei bekanntem \mathcal{E} und J die Anfangsspannung \mathcal{E}_0 , falls der äquivalente Kondensator am Anfang der Linie (Fig. 61), die zweite dagegen den Strom J_0 , falls der äquivalente Kondensator am Ende der Linie (Fig. 62) angeordnet ist. Berechnet man für jeden dieser beiden Fälle \mathcal{E}_0 und J_0 und bildet aus den beiden

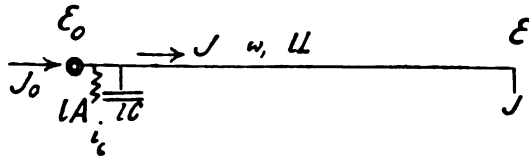


Fig. 61.

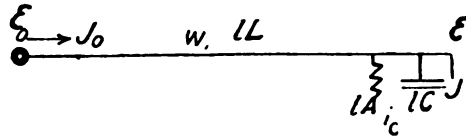


Fig. 62.

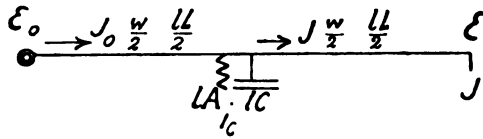


Fig. 63.

\mathcal{E}_0 und J_0 das Mittel, so entsprechen diese Mittelwerte dem Fall, dass der äquivalente Kondensator ungefähr in der Mitte der Linie angeordnet ist. Man erhält dann nach Fig. 61:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_0 &= \mathcal{E} + JZ \\ J_0 &= J + i_c = J + \mathcal{E}_0 Y_c = J (1 + Z Y_c) + \mathcal{E} Y_c \end{aligned} \right\} \quad (100)$$

und nach Fig. 62:

$$\left. \begin{aligned} J_0 &= J + i_c = J + \mathcal{E} Y_c \\ \mathcal{E}_0 &= \mathcal{E} + J_0 Z = \mathcal{E} (1 + Z Y_c) + J Z \end{aligned} \right\} \quad (101)$$

Die Mittelwerte aus Gleichung (100) und (101) sind also:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_0 &= \mathcal{E} \left(1 + \frac{Z Y_c}{2} \right) + J Z \\ J_0 &= J \left(1 + \frac{Z Y_c}{2} \right) + \mathcal{E} Y_c \end{aligned} \right\} \quad (102)$$

Diese Mittelwerte sind mit den in den Gleichungen (99) dargestellten Werten bis auf das Glied $\frac{Z Y_c}{6}$ identisch, stehen also bezüglich der Genauigkeit zwischen den Werten der Gleichungen (98) und (99).

Man würde ebenso zur Berechnung der Strom- und Spannungsverteilung gelangen, wenn man nach Fig. 63 den Kondensator in der Mitte der Leitung

anordnete, den Energieverbraucher durch die äquivalente Impedanz $\frac{\varepsilon}{J}$ ersetzte und nun die gesamte Impedanz des Stromkreises nach [54] berechnete. Diese Rechnungen sind jedoch komplizierter, als die durch die Gleichungen (98), (102) und (99) bedingten, so dass diese vorzuziehen sind.

60. Aus den Gleichungen (98), (102) und (99) ergibt sich der Spannungsabfall des Leiters $\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon$ mit steigender Genauigkeit zu

Querschnittsberechnung langer Leitungen.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= JZ \\ \varepsilon &= JZ + \varepsilon \frac{ZY_c}{2} \\ \varepsilon &= JZ \left(1 + \frac{ZY_c}{6} \right) + \varepsilon \frac{ZY_c}{2} \end{aligned} \right\} \dots \dots (103)$$

Benutzen wir die erste einfachste Formel zur Querschnittsberechnung, so erhalten wir zunächst bei gegebener Endspannung ε und bekanntem Belastungsstrom J als Anfangsspannung

$$\varepsilon_0 = \varepsilon + \varepsilon = \varepsilon + J(n + jL\omega).$$

ε_0 wird also graphisch erhalten, indem (Fig. 64) Jn in der Richtung von J , $jL\omega$ senkrecht dazu in der Richtung der Voreilung aufgetragen und ε als Resultierende beider vektoriell zu ε addiert wird. Wie früher [57] ist $\angle(\varepsilon J) = (\varepsilon_0 J)$ und der Spannungsverlust $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_1 = \varepsilon_r = \varepsilon \cos(\varepsilon\varepsilon)$ zu setzen, da auch hier, wegen der im Verhältnis zu ε bzw. ε_0 stets geringen Grösse von ε , ε sehr nahe gleich seiner rechtwinkligen Projektion auf ε_0 ist. Ein wesentlicher Unterschied gegen früher springt jedoch sofort ins Auge: Die Reaktanz vergrössert den Spannungsabfall und den Spannungsverlust, verkleinert dagegen den energielosen Betrag des Spannungsabfalls. Nach Fig. 64 ist:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \varepsilon \cos(\varepsilon\varepsilon) = Jn \cos \varphi + jL\omega \sin \varphi \\ \varepsilon_i &= \varepsilon \sin(\varepsilon\varepsilon) = jL\omega \cos \varphi - Jn \sin \varphi \end{aligned} \right\} \dots \dots (104)$$

Dasselbe ergibt die Rechnung, wenn wir J und ε in komplexer Form schreiben. Wie Fig. 64 zeigt, wird dann

$$\begin{aligned} \varepsilon [\cos(\varepsilon\varepsilon) + j \sin(\varepsilon\varepsilon)] &= J(\cos \varphi - j \sin \varphi)(n + jL\omega) \\ &= Jn \cos \varphi + jL\omega \sin \varphi + j(jL\omega \cos \varphi - Jn \sin \varphi), \end{aligned}$$

woraus die angegebenen Ausdrücke für ε_r und ε_i folgen. Ferner wird

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2} \\ \angle(\varepsilon\varepsilon) &= \varphi + \psi = \varphi + \arctg \frac{jL\omega}{n} \end{aligned} \right\} \dots \dots (105)$$

wobei die Winkel φ und ψ mit den entsprechenden Vorzeichen zu versehen sind. In unserem Falle ist φ negativ, ψ positiv und $\angle(\varepsilon\varepsilon)$ ebenfalls positiv, da $\psi > \varphi$.

Soll nun bei gegebenem ε , J , φ und für einen bestimmten Spannungsverlust ε_r der Leitungsquerschnitt berechnet werden, so schreiben wir zunächst die Gleichungen (104) in folgender Form:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_w &= Jn \cos \varphi \left(1 + \frac{lL\omega}{n} \operatorname{tg} \varphi \right) = Jn \cos \varphi (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi) \\ \varepsilon_l &= Jn \sin \varphi \left(\frac{lL\omega}{n} \cot \varphi - 1 \right) = Jn \sin \varphi (\cot \varphi \operatorname{tg} \psi - 1) \end{aligned} \right\} \quad (106)$$

Wir erhalten dann:

$$q = \frac{e_l}{\varepsilon_w} J \cos \varphi (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi) \quad (107)$$

Diese Gleichung enthält zwar ausser q noch die Unbekannte ψ , jedoch führt das folgende Näherungsverfahren schnell zum Ziel: Wir nehmen zunächst $\psi = 0$, d. h. $L = 0$ an und erhalten dann aus Gleichung (107) die bereits bekannte Gleichung (XV) [58]:

$$q = \frac{e_l}{\varepsilon_w} l J \cos \varphi.$$

Wird nun die Entfernung der Leiter voneinander D [cm] auf Grund der zu verwendenden Spannung angenommen, so ergibt Gleichung (61) [49] die Induktivität L , also auch die Reaktanz $x = lL\omega$ und $\operatorname{tg} \psi = \frac{lL\omega}{n}$. Mit diesen Werten wird nun mittels Gleichung (108) der genauere Querschnitt berechnet und, falls notwendig, die Rechnung wiederholt. Dann wird mit Hilfe der Gleichungen (67) bis (70) [51] die Kapazität ermittelt, während die Ableitung, wenigstens bei Luftlinien, um die es sich bei sehr langen Leitungen und hohen Spannungen ja handelt, fast stets vernachlässigt werden kann. Mit C ist $Y_c = lC\omega 10^{-6}$ bekannt, so dass an Hand der Gleichungen (98), (99) und (102) bzw. (103) und (105) die Werte von ε_0 und J_0 berechnet und ε_w kontrolliert werden können. Ergibt diese Prüfung, dass ε_w zu gross ausfällt, so würde q entsprechend vergrössert bzw. D verkleinert werden müssen.

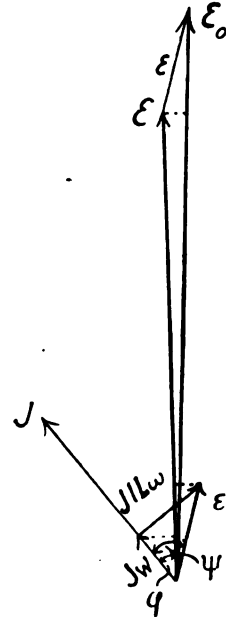


Fig. 64.

Der Energieverlust e eines Leiters mit dem Spannungsabfall ε ermittelt sich schliesslich (Fig. 64) zu

$$e = \varepsilon J \cos (\varepsilon J) = \varepsilon J \cos \psi = J^2 n \quad (108)$$

Ist also die Aufgabe gestellt, eine Leitung für einen gegebenen Energieverlust zu berechnen, so ergibt sich n bzw. q unmittelbar aus Gleichung (108) und es ist dann nach dem Vorhergehenden der Spannungsverlust in der Leitung zu berechnen.

Es soll eine Nutzleistung von 500 KW bei einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0.8$ (induktive Belastung) auf 100 km Entfernung mittels einer Kupferleitung übertragen werden. Zur Verwendung gelangt Drehstrom von 20000 Volt Nutzspannung und 50 Perioden in der Sekunde. Die Entfernung der in Form eines gleichseitigen Dreiecks angelegten Leiter voneinander soll 75 cm betragen. Spannung und Strom am Anfang der Leitung soll für einen Spannungsverlust von 10% berechnet werden.

Beispiel.

Wir haben also $E = 20000$, $\varepsilon = \frac{E}{\sqrt{3}} = 11540$, $\varepsilon_w = 1154$ Volt, $\mathcal{E} = \sqrt{3} EJ$
 $\cos \varphi = 5 \cdot 10^5$ Watt, folglich $J = \frac{95}{\sqrt{3} \cdot 0.8} = 18$ Amp., $l = 10^5$ m, $\omega = 2\pi p$
 $= 314$. Nach Gleichung (XV) wird

$$q = \frac{q}{\varepsilon_w} l J \cos \varphi = \frac{0.018}{1154} \cdot 10^5 \cdot 18 \cdot 0.8 = 22.5 \text{ } \therefore 25 \text{ mm}^2$$

nach Gleichung (61)

$$L = 4.606 \left(\log \frac{D}{\sqrt{q}} + 1.748 \right) 10^{-7} \frac{\text{Henry}}{\text{m}}$$

also

$$x = l L \omega = 4.606 \cdot 2.924 \cdot 314 \cdot 10^{-3} = 42 \Omega$$

$$w = \frac{0.018}{25} \cdot 10^5 = 72 \Omega$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{42}{72} = 0.58.$$

Daher wird nunmehr nach Gleichung (107)

$$q = 22.5 (1 + 0.8 \cdot 0.58) = 33 \therefore 38.5 \text{ mm}^2 (d = 0.7 \text{ cm}).$$

Die zweite Durchrechnung ergibt

$$x = 4.606 \cdot 2.830 \cdot 314 \cdot 10^{-3} = 41.0 \Omega$$

$$w = \frac{0.018}{38.5} \cdot 10^5 = 46.7 \Omega$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{41.0}{46.7} = 0.88$$

$$q = 22.5 (1 + 0.8 \cdot 0.88) = 38.4,$$

wie vorher.

Wir nehmen also $q = 38.5 \text{ mm}^2$, entsprechend einem Drahtdurchmesser von 7 mm, an. Hierfür ist $w = 46.7 \Omega$, $x = 41.0 \Omega$, $z = \sqrt{46.7^2 + 41.0^2} = 62.1 \Omega$, $\operatorname{tg} \psi = 0.88$, $\psi = +41^\circ 20'$, $\varphi = -36^\circ 50'$, also $\angle (\mathcal{E} \varepsilon) = \varphi + \psi = +4^\circ 30'$, d. h. $\varepsilon \perp \mathcal{E}$ entsprechend der Fig. 64. $\cos (\mathcal{E} \varepsilon) = 0.997$, $\sin (\mathcal{E} \varepsilon) = 0.078$. Ferner nach Gleichung (68) [51]

$$C = \frac{2.41 \cdot 10^{-5}}{\log \left(17.7 \frac{D}{\sqrt{q}} \right)} = 1.033 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Mi}}{\text{m}}$$

also, wenn $A = 0$ gesetzt wird:

$$I_c = j l C \omega = j 324 \cdot 10^{-6} = 0.324 \cdot 10^{-3} e^{j 90^\circ}$$

$$Z = w + j l L \omega = 46.7 + j 41.0 = 62.1 e^{j 41^\circ 20'},$$

e bedeutet hier wieder die Basis des natürlichen Logarithmensystems.

Ferner ist

$$12.1 \cdot 0.324 \cdot 10^{-3} e^{j 131^\circ 20'} = 20 \cdot 10^{-3} e^{j 131^\circ 20'} = (-13 + j 15) 10^{-2}$$

$$= (-6.5 + j 7.5) \cdot 10^{-3} = 10 \cdot 10^{-3} e^{j 131^\circ 20'}$$

$$= (-2 + j 2.5) 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} e^{j 131^\circ 20'}$$

$$Z I_c = 0.994 + j 7.5 \cdot 10^{-3} = 0.994 e^{j 0^\circ 24'}$$

$$Z Y_c = 0.998 + j 2.5 \cdot 10^{-3} = 0.998 e^{j 0^\circ 10'}.$$

Also die Korrektionsgrösse $\frac{ZY_c}{2} \dot{\mathcal{E}}$ ist ein um $+131^\circ$ gegen $\dot{\mathcal{E}}$ verschobener Vektor, dessen Grösse nur etwa $1\frac{0}{10}$ von $\dot{\mathcal{E}}$ beträgt. Auf den Spannungsverlust wirkt nur die Energiekomponente der Korrektionsgrösse, und zwar im negativen Sinne ($-6.5 \cdot 10^{-3}$), d. h. sie verkleinert den Spannungsverlust um $0.6\frac{0}{10}$ von $\dot{\mathcal{E}}$ oder um etwa $6\frac{0}{10}$ von ϵ_w . Die Grössen $\frac{ZY_c}{6} \dot{J}Z$ und $\frac{ZY}{6} \dot{\mathcal{E}}I_c$ sind gegen 1 völlig zu vernachlässigen, da sie nur $0.2\frac{0}{10}$ der entsprechenden Vektoren betragen. Demnach berechnen sich Spannung und Strom am Anfang der Linie nach Gleichung (98) zu

$$\begin{aligned}\dot{\mathcal{E}}^0 &= \dot{\mathcal{E}} + \dot{J}Z = 11540 + 18 e^{-j36^\circ 50} \cdot 62 e^{j41^\circ 20} \\ &= 11540 + 1116 e^{j4^\circ 30} \\ &= 11540 + 1113 + j87 \\ &= 12653 + j87 = 12653 e^{j0^\circ 24} = 12653 \underline{0^\circ 24} \text{ (gegen } \dot{\mathcal{E}}),\end{aligned}$$

woraus

$$\begin{aligned}\epsilon &= \dot{\mathcal{E}}_0 - \dot{\mathcal{E}} = 1113 + j87; \epsilon_w = 1113 = 0.096 \dot{\mathcal{E}}. \\ \dot{J}_0 &= \dot{J} + \dot{\mathcal{E}}I_c = 18 e^{-j36^\circ 50} + 11540 \cdot 0.324 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j90^\circ} \\ &= 14.4 - j10.8 + j3.7 \\ &= 14.4 - j7.1 = 16.0 e^{-j26^\circ} = 16.0 \underline{26^\circ},\end{aligned}$$

woraus sich $i_c = J_0 - J = j3.7$, also 3.7 Amp. Ladestrom berechnet, der die Phasennachteilung von 36° ($\cos \varphi = 0.8$) am Ende auf 26° ($\cos \varphi = 0.9$) am Anfang der Linie und den Gesamtstrom von 18 auf 16 Amp. verkleinert.

Nach Gleichung (102) ergeben sich die genauen Werte

$$\begin{aligned}\dot{\mathcal{E}}_0 &= \dot{\mathcal{E}} \left(1 + \frac{ZY_c}{2}\right) + \dot{J}Z = 11540 \cdot 0.994 e^{j0^\circ 24} + 1116 e^{j4^\circ 30} \\ &= 11470 + j80 + 1113 + j87 \\ &= 12583 + j167 = 12585 e^{j0^\circ 45} = 12585 \underline{0^\circ 45},\end{aligned}$$

woraus

$$\begin{aligned}\epsilon &= 1043 + j167; \epsilon_w = 1043 = 0.090 \dot{\mathcal{E}}. \\ \dot{J}_0 &= \dot{J} \left(1 + \frac{ZY_c}{2}\right) + \dot{\mathcal{E}}I_c = 18 \cdot e^{-j36^\circ 50} \cdot 0.994 e^{j0^\circ 24} + j3.74 \\ &= 17.89 e^{-j36^\circ 26} + j3.74 \\ &= 14.40 - j10.60 + j3.74 \\ &= 14.40 - j6.86 = 15.95 e^{-j25^\circ 25} = 15.95 \underline{25^\circ 25},\end{aligned}$$

also $i_c = 3.74$ Amp.

Die Ergebnisse der ersten gekürzten Rechnung stimmen also für die gewählten Verhältnisse praktisch vollkommen mit denen der genauen Rechnung überein.

Aus $\dot{\mathcal{E}}_0$ wird schliesslich E_0 als $\dot{\mathcal{E}}_0 \sqrt{3} = 21940$ bzw. 21800 Volt erhalten. Der gesamte Spannungsverlust der Leitung $\epsilon_w \sqrt{3}$ berechnet sich zu 1930 bzw. 1808 Volt, so dass also in der That am Ende der Leitung 20000 Volt zur Verfügung stehen.

Die geschlossenen Zweileiter-Leitungsnetze.

61.
Defini-
tionen.

Wir haben bei den einfachen Gebilden des offenen Leitungsstranges gesehen, dass ein solcher aus zwei gleichen Leitern besteht, zwischen denen einerseits die Energieverbraucher, andererseits der oder die Energieerzeuger liegen. Werden mehrere solcher Leitungen untereinander in der Weise vereinigt, dass zwei gleiche Leitungskomplexe entstehen, die wiederum durch

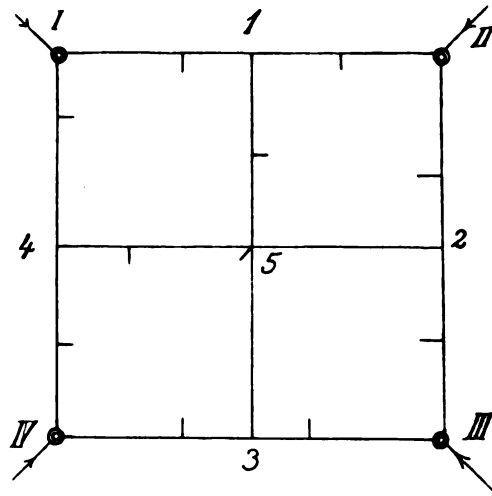


Fig. 65.

die Energieerzeuger und -Verbraucher miteinander verbunden sind, so entsteht ein geschlossenes Leitungsnetz (Fig. 65), wenn die Einzelleiter jeder Netzhälfte so miteinander verbunden sind, dass sie sämtlich oder zum Teil geschlossene Figuren bilden, in denen der Strom jedem Energieverbraucher von zwei oder mehr Seiten her zufließen kann. Einfache geschlossene Figuren heißen Maschen, zum Unterschiede von denjenigen geschlossenen Kreisen, die sich aus mehreren einfachen Figuren zusammensetzen. Punkte, von denen aus man nach mehr als zwei Richtungen gehen kann, in denen sich also drei oder mehr Leiter vereinigen, heißen Kreuzungspunkte, und zwar Speisepunkte, wenn in ihnen der Energieerzeuger bezw. die ihn ersetzende Speiseleitung angeschlossen ist, Knotenpunkte, wenn dies nicht der Fall ist.

Die Speisepunkte (Fig. 65) sollen mit römischen, die Knotenpunkte mit arabischen Ziffern benannt werden. Die einzelnen Leiter reichen stets von einem Kreuzungspunkt zum andern und werden mit den entsprechenden Endziffern bezeichnet, also Leitung $I1$ oder 15 , ihre Widerstände mit w_{I1} bzw. w_{15} , ihre Leitfähigkeiten mit g_{I1} bzw. g_{15} , der in ihnen fließende Strom mit J_{15} , wenn er von 1 nach 5, mit $J_{51} = -J_{15}$, wenn er von 5 nach 1 fließt, und der durch den letzteren verursachte Spannungsabfall mit ε_{15} bzw. $\varepsilon_{51} = -\varepsilon_{15}$, und zwar soll $\varepsilon_{15} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_5$, $\varepsilon_{51} = \mathcal{E}_5 - \mathcal{E}_1$ sein, wenn \mathcal{E}_1 und \mathcal{E}_5 die Potentiale der Punkte 1 und 5, also ihre Spannungen gegen den Nullpunkt des Systems sind. Ferner werden die Stromabnahmen in den Knotenpunkten mit $J_1, J_2 \dots$ und die Spannungsverluste vom Speisepunkte bis zu den Knotenpunkten unter Fortlassung der römischen Ziffern ebenfalls nur mit den entsprechenden arabischen Ziffern bezeichnet, so dass also $\varepsilon_1 = \varepsilon_{I1} = \varepsilon_{II1}$, dagegen $\varepsilon_5 = \varepsilon_1 + \varepsilon_{15} = \varepsilon_2 + \varepsilon_{25} = \dots$ wird.

62.
Bezeich-
nungen.

Netzen.

Wenden wir auf den Stromkreis der Fig. 67 die KIRCHHOFFschen Sätze an, so folgt sofort, da selbstverständlich

$$J_I + J_{II} = \sum_1^n \dot{i}_v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (109)$$

sein muss:

$$\left. \begin{aligned} J_{I_1} &= J_I = -\left(J_{II} - \sum_n^1 i_v\right) \\ J_{I_2} &= J_I - i_1 = -\left(J_{II} - \sum_n^2 i_v\right) \\ J_{I_3} &= J_I - \sum_1^2 i_v = -\left(J_{II} - \sum_n^3 i_v\right) \\ &\vdots \\ J_{I_{v-1,v}} &= J_I - \sum_1^{v-1} i_v = -\left(J_{II} - \sum_n^v i_v\right) \\ J_{n II} &= -J_{II} = J_I - \sum_1^n i_v \end{aligned} \right\} \quad (110)$$

und ferner:

$$J_I n_{I1} + \sum_2^n J_{r-1,v} w_{r-1,v} - J_{II} w_{II n} = 0$$

oder wenn wir diese Gleichung mittelst (110) nach J_{II} entwickeln:

$$i_1 w_{I1} + i_2 w_{I2} + \dots + i_v w_{Iv} + \dots + i_n w_{In} - J_{II} w_{II} = 0,$$

d. h. wenn wir den Widerstand der ganzen Linie w_{II} mit w bezeichnen:

$$J_{II} w = \sum_1^n i_v w_{Iv} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (111)$$

Ein Vergleich dieser Gleichung mit (29) [37]

$$\sum_1^n i_v w_v = (i) w$$

zeigt, dass dem ideellen Strom (i), der bei offenen Leitungen den Spannungsverlust ε aufheben würde, hier der dem Speisepunkt II zugeführte reelle

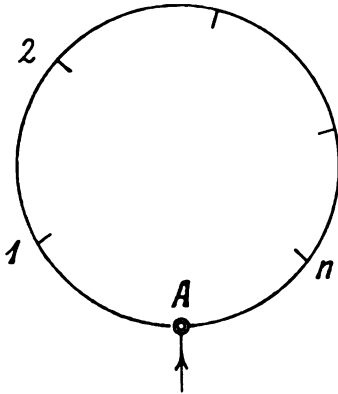


Fig. 66.

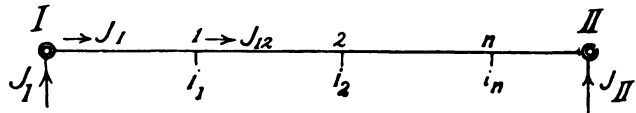


Fig. 66 a.

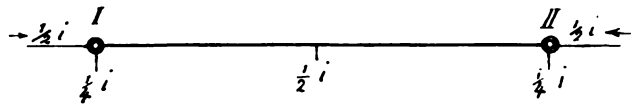


Fig. 67.

Strom J_{II} entspricht, der den Spannungsverlust $\sum_1^n i_v w_{Iv}$ in der geschlossenen Leitung wirklich aufhebt.

Ersetzen wir in Gleichung (111) mittelst (109) J_{II} durch J_I , so ergibt sich

$$J_I w = \sum_1^n i_v w_{IIv} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (112)$$

eine Gleichung, die ganz ähnlich gebildet ist, wie die für J_{II} , indem nur die Widerstände w_{Iv} durch $w_{IIv} = w - w_{Iv}$ ersetzt sind, da ja nunmehr entsprechend der Vertauschung von J_I und J_{II} die Widerstände von II nach I hin zählen.

Durch die beiden letzten Gleichungen ist die Stromverteilung und infolgedessen auch die Spannungsverteilung eindeutig bestimmt, wenn die Widerstände und Belastungen des Leitungsstranges gegeben sind. Wir erhalten

$$\left. \begin{aligned} J_I &= \frac{1}{w} \sum_1^n i_v w_{IIv} = g \sum_1^n \frac{i_v}{g_{IIv}} \\ J_{II} &= \frac{1}{w} \sum_1^n i_v w_{Iv} = g \sum_1^n \frac{i_v}{g_{Iv}} \end{aligned} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XIX)$$

und mit Hilfe der Gleichungen (110) die Leiterströme. Sind diese positiv, d. h. ist $J_I > \sum_1^{r-1} i_r$, so fließt der Strom vom Punkte $r - 1$ nach r und umgekehrt. Im allgemeinen wird also einer bestimmten Abzweigung i_k der Strom von beiden Seiten zufließen und in diesem Punkte ergibt sich dann der grösste Spannungsverlust des Stranges. Im besonderen kann auch der Fall eintreten, dass die Abzweigung i_k ganz von I , die Abzweigung i_{k+1} ganz von II gespeist wird. In diesem Falle ist das Leitungsstück $k, k + 1$ stromlos und die Spannungsverluste in den Abzweigepunkten k und $k + 1$ sind gleich und gleich dem maximalen Spannungsverlust. Dieser berechnet sich in beiden Fällen zu

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon = \varepsilon_m &= J_I w_{I1} + \sum_2^k J_{r-1,r} w_{r-1,r} \\ &= J_{II} w_{II n} + \sum_n^{k+1} J_{r,r-1} w_{r,r-1} \end{aligned} \right\} \dots \dots (XX)$$

wo k bestimmt ist durch die Bedingung

$$\sum_1^{k-1} i_r < J_I \leq \sum_1^k i_r \text{ oder } \sum_n^{k+1} i_r < J_{II} \leq \sum_n^k i_r.$$

Bezeichnet man den von I der Abzweigung i_k zufließenden Strom mit $(i_k)_I$, also den von II her zufließenden Anteil mit $(i_k)_{II}$, so lassen sich die letzten Gleichungen (134) auch schreiben:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \sum_1^{k-1} i_r w_{Ir} + (i_k)_I w_{Ik} \\ &= \sum_n^{k+1} i_r w_{IIr} + (i_k)_{II} w_{IIk} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (XXa)$$

wie sich leicht ergibt, wenn für J die aus (110) folgenden Werte eingesetzt werden.

Die letzten Formeln für J und ε vereinfachen sich, wenn der Querschnitt des Leitungstranges konstant ist. Es ist nach Gleichung (3) [3]

$$w = \frac{e^l}{q},$$

also wird aus Gleichung (XIX)

$$\left. \begin{aligned} J_I &= \frac{1}{l} \sum_1^n i_r l_{IIr} \\ J_{II} &= \frac{1}{l} \sum_1^n i_r l_{Ir} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (XXI)$$

und aus Gleichung (XX) und (XXa)

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{e}{q} \left(J_I l_{I1} + \sum_2^k J_{r-1,r} l_{r-1,r} \right) \\ &= \frac{e}{q} \left(J_{II} l_{II n} + \sum_n^{k+1} J_{r,r-1} l_{r,r-1} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (XXII)$$

$$\varepsilon = \frac{\varrho}{q} \left(\sum_1^{k-1} i_v l_{Iv} + (i_k)_I l_{Ik} \right) \left\{ \begin{array}{l} \dots \dots \dots \end{array} \right. \quad \text{(XXII a)}$$

$$= \frac{\varrho}{q} \left(\sum_n^{k+1} i_v l_{Iv} + (i_k)_{II} l_{IIk} \right) \left\{ \begin{array}{l} \dots \dots \dots \end{array} \right.$$

Im besonderen ist bei einer einzigen Abzweigung i in der Mitte des Leiters, wie aus den Gleichungen (XXI) und (XXII) leicht folgt,

$$\left. \begin{array}{l} J_I = J_{II} = \frac{1}{2} i \\ \varepsilon = \frac{1}{4} \frac{i l}{q} \varrho \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad \text{(XXIII)}$$

64.
Besondere
Fälle der
Strom-
verteilung.

Der Spannungsverlust — bzw. bei gleichem Spannungsverlust der Querschnitt — ist gegenüber der Stromzuführung von einer Seite auf die Hälfte herabgegangen (Gleichung (I) [3]).

Ist ferner die Belastung i auf die ganze Leiterlänge gleichmässig verteilt, so dass auf jedes Leiterelement die Stromabnahme $di = \frac{i}{l} dl$ kommt, so wird wieder:

dagegen

$$\left. \begin{array}{l} J_I = J_{II} = \frac{1}{2} i \\ \varepsilon = \frac{1}{8} \frac{i l}{q} \varrho \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad \text{(XXIV)}$$

denn der Strom in der Entfernung x vom Anfang ist $\frac{1}{2} i - \frac{i}{l} x$, also der Spannungsverlust im Leiterelement dx :

$$d\varepsilon = J \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l} \right) dx,$$

woraus ε folgt, wenn von 0 bis $\frac{1}{2} l$, dem Punkt des grössten Spannungsverlustes, integriert wird. Hier ist also der Spannungsverlust nur ein Viertel so gross, als wenn unter gleichen Umständen die Stromlieferung nur von einer Seite her erfolgte (Gleichung (XI) [41]). Ohne die Verhältnisse ausserhalb der Strecke $I II$ zu ändern, können wir uns, wie die Fig. 67 in Übereinstimmung mit den Gleichungen (XXIII) zeigt, die gleichmässige Belastung von $I II$ mit dem Gesamtstrom $i = \int_0^l \frac{i}{l} dl$ ersetzt denken durch eine Einzellast von der Grösse $\frac{1}{2} i$ in der Mitte der Strecke und durch je eine Stromabnahme von der Grösse $\frac{1}{4} i$, die unmittelbar in den Speisepunkten I und II angreifen.

Die Gleichungen (XIX) können wir auch in einer Form schreiben, die das Überlagerungsprinzip für Ströme deutlich ausdrückt, nämlich

$$\left. \begin{array}{l} J_I = \sum_1^n i_v \frac{w_{IIv}}{w} = \sum_1^n i_v \frac{g}{g_{IIv}} = \sum_1^n i_v I \\ J_{II} = \sum_1^n i_v \frac{w_{Iv}}{w} = \sum_1^n i_v \frac{g}{g_{Iv}} = \sum_1^n i_v II \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad (113)$$

65.
Überlage-
rung der
Ströme im
ge-
schlossenen
Leitungs-
strang

wenn

$$\left. \begin{aligned} i_{vI} &= i_v \frac{w_{IIv}}{w} = i_v \frac{g}{g_{IIv}} \\ i_{vII} &= i_v \frac{w_{Iv}}{w} = i_v \frac{g}{g_{Iv}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (114)$$

die von den Speisepunkten *I* und *II* der *v*-ten Stromabzweigung zufließenden Ströme bezeichnen. Hieraus folgt weiter:

$$\frac{i_{vI}}{i_{vII}} = \frac{w_{IIv}}{w_{Iv}} = \frac{g_{Iv}}{g_{IIv}} \dots \dots \dots (115)$$

d. h. aber: Jede Abzweigung wird unabhängig von den anderen Stromentnahmestellen von beiden Seiten des Leitungsstranges her, und zwar im umgekehrten Verhältnis der den Speisepunkten anliegenden Teilwiderstände oder proportional den anliegenden Teilleitfähigkeiten der Strecke, gespeist. Jede Abzweigung verhält sich demnach, als ob sie allein vorhanden wäre. Die einzelnen Teilströme addieren (superponieren) sich und ergeben die gesamte von jedem Speisepunkte zu liefernde Stromstärke, sowie die in den einzelnen Teilstrecken fließenden Leiterströme.

Für konstanten Querschnitt erhalten die Gleichungen (114) und (115) wieder die einfachere Form

$$\left. \begin{aligned} i_{vI} &= i_v \frac{l_{IIv}}{l} \\ i_{vII} &= i_v \frac{l_{Iv}}{l} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (114a)$$

$$\frac{i_{vI}}{i_{vII}} = \frac{l_{IIv}}{l_{Iv}} \dots \dots \dots (115a)$$

66.
Quer-
schnitts-
berechnung
des ge-
schlossenen
Leitungs-
stranges.

Sollen bei bekannten Belastungen i_v die Widerstände bzw. die Querschnitte der einzelnen Leitungsstrecken berechnet werden, mit der Bestimmung, dass der maximale Spannungsverlust eine bestimmte Grösse ε nicht überschreiten dürfe, so stehen uns zur Bestimmung der Unbekannten J_I , J_{II} und der $n + 1$ Teilwiderstände des Leiters nur die drei Gleichungen (XIX) und (XX) zur Verfügung. Wir dürfen also, wie früher [38 ff.], über n Unbekannte noch weitere Annahmen machen, die zur Aufstellung der fehlenden n Gleichungen dienen. Eine eingehende Behandlung dieser Verhältnisse erübrigt sich jedoch an dieser Stelle, da wir uns mit der Bemessung der Querschnitte bei geschlossenen Leitungsnetzen in einem späteren Abschnitt [109 ff.] zu beschäftigen haben werden.

In einem Falle jedoch genügen die drei angeführten Gleichungen unmittelbar zur Querschnittsberechnung, nämlich wenn der Leiter konstanten Querschnitt erhält. Die Gleichungen (XXI) geben dann unmittelbar die Stromverteilung und die Gleichungen (XXII) bzw. (XXII a) den Querschnitt.

67.
Graphische
Darstellung
der Strom-
und
Spannungs-
verteilung.

Zu einer anschaulichen graphischen Darstellung der Stromverteilung in einem geschlossenen Leitungsstrang gelangt man, wenn man die Stromstärken J_I , $J_{12} = J_I - i_1, \dots J_{II}$ als Ordinaten über dem Widerstand bzw. der Länge des Leitungsstranges (letzteres bei konstantem Querschnitt) als Abscisse aufträgt, und zwar die von *I* gegen *II* fließenden (positiven) Ströme nach oben,

die von II gegen I fließenden (negativen) nach unten (Fig. 68). Dem Abzweigungspunkte 2 fließt, wie ersichtlich, der Strom J_{12} von links, der Strom J_{32} von rechts her zu und ihre Summe ergibt den abzweigenden Strom i_2 .

Auch die das Überlagerungsprinzip darstellenden Gleichungen (113) bis (115) eignen sich vortrefflich zur graphischen Erläuterung der Stromverteilung. Die den einzelnen Abzweigungspunkten von I und II zufließenden Teilströme werden über bzw. unter der Horizontalen aufgetragen (Fig. 69); ihre Summe giebt, wie vorher, die endgültige Stromverteilung.

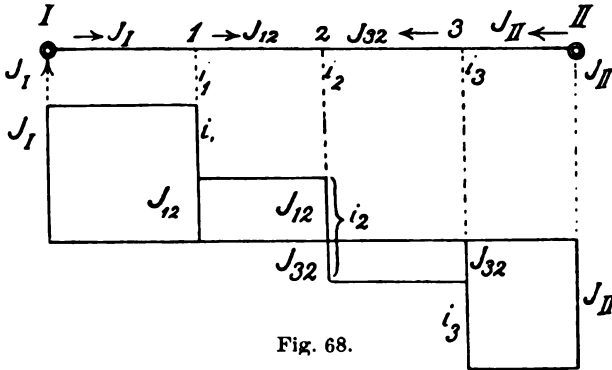


Fig. 68.

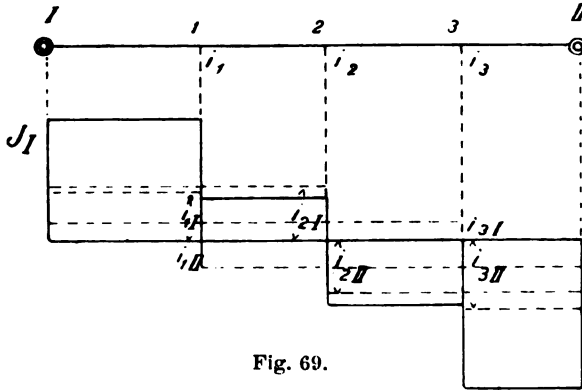


Fig. 69.

Der Spannungsabfall in den einzelnen Strecken wird, wie wir früher gesehen haben [37], durch eine gegen die Abscissenachse geneigte Gerade dargestellt. Diese Gerade steigt an, wenn der den Spannungsverlust verursachende Strom positiv ist, im andern Falle fällt sie gegen die Abscissenachse ab. Wenn wir demnach die Teilspannungsverluste $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1I}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{1I} + \varepsilon_{12}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_2 - \varepsilon_{32}$ in den Punkten 1, 2 und 3 als Ordinaten auftragen und die Endpunkte untereinander und mit I und II verbinden (Fig. 70), so erhalten wir als Darstellung der Spannungsverteilung die gebrochene Linie $I'1'2'3'II'$, deren senkrechte Abstände von der Horizontalen die an jedem Punkte der Strecke herrschenden Spannungsverluste bedeuten. Der grösste Spannungsabfall ε wird bei der Abzweigung 2 erreicht. Bei den Punkten I und II ist der Spannungsverlust gleich Null, entsprechend der Bedingung, dass in diesen Punkten die Potentiale einander gleich sein sollen.

Auch die graphische Darstellung der Gleichung ·111·

$$J_{II} \pi = \sum_1^n i_v \pi I_v$$

ergibt die gleiche Verlustkurve Fig. 71. Die rechte Seite der Gleichung stellt den Spannungsverlust des offenen Leitungsstranges [37] mit I als Speisepunkt, also den Linienzug $I'1''2''3''II''$, die linke Seite den durch den negativen Strom J_{II} hervorgerufenen negativen Spannungsverlust ϵ_{II}' dar, der daher nach unten aufzutragen ist und die Gerade $I'II'''$ ergibt. Die algebraische Summe beider giebt, wie vorher, die den wirklichen Verhältnissen entsprechende Spannungsverlustkurve $I'1'2'3'II'$. Trägt man dagegen den Spannungsverlust $J_{II} \pi$ positiv auf, verbindet man also I' mit II'' , so bezeichnen die Differenzen der Ordinaten des Linienzuges $I'1''2''3''II''$ und der Geraden $I'II'''$, also die senkrechten Abstände beider Linienzüge, den

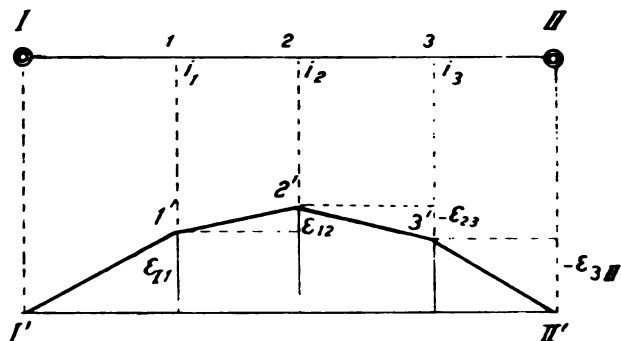


Fig. 70.

an jedem Punkte herrschenden Spannungsabfall. Beide Darstellungen geben das gleiche Ergebnis.

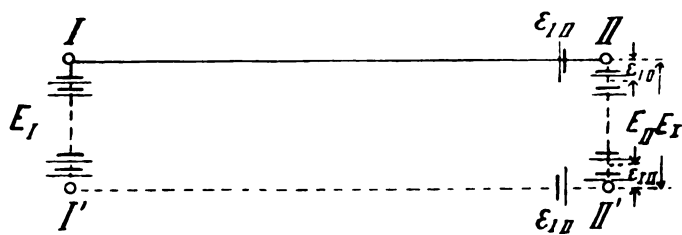
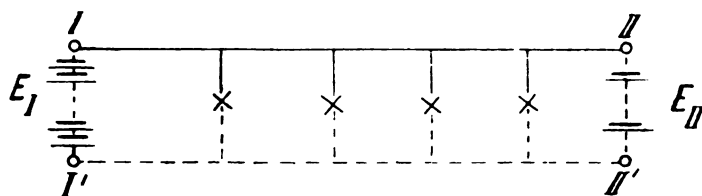
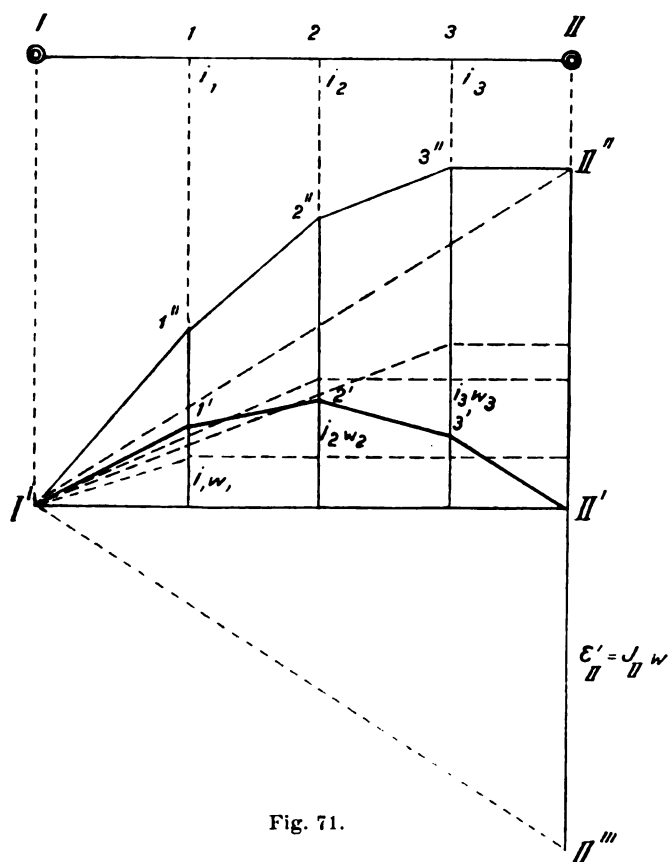
66. Wir haben die Entstehung des geschlossenen Leitungsstranges ohne Knotenpunkt mit zwei Speisepunkten aus der wirklichen Ring- oder Kreisleitung mit einem Speisepunkte abgeleitet und daraus die Bedingung gewonnen, dass die Speisepunkte gleiches Potential besitzen. Ein solcher Leitungsstrang heisst vollkommen geschlossen, zum Unterschied von dem unvollkommen geschlossenen Leitungsstrang, dessen Speisepunkte aus irgend einem Grunde nicht gleiches Potential besitzen, z. B. weil sie durch zwei Stromquellen ungleicher Spannung E_I und E_{II} gebildet werden (Fig. 72), so dass

$$E_I - E_{II} = 2 \epsilon_{III} < 0.$$

Der unvollkommen geschlossene Leitungsstrang ist also der allgemeinere Fall, der den vollkommen geschlossenen einschliesst und in ihn übergeht, wenn

$$E_I = E_{II}, \text{ also } \epsilon_{III} = 0.$$

Den unvollkommen geschlossenen Kreis kann man natürlich nicht widerstandslos schliessen, man kann also nicht die Speisepunkte I und II aufeinander legen, ohne die Stromverteilung zu ändern, da ja die dadurch ent-



stehenden Verhältnisse wegen Nichtberücksichtigung von ε_{II} den thatsächlichen Verhältnissen nicht mehr entsprechen würden. Schalten wir aber in jeden der beiden Leiter I II und I' II' in irgend einem Punkte die dem Potentialunterschied ε_{II} entsprechende EMK ε_{II} ein und addieren wir gleichzeitig zu E_I die EMK $-2\varepsilon_{II}$ (Fig. 73) — oder, was dasselbe wäre, subtrahieren wir von E_I die EMK $-2\varepsilon_{II}$ —, so ändern wir nichts an der Spannungsverteilung des Stromkreises, da sich ja die beiden EMKe $+2\varepsilon_{II}$ und $-2\varepsilon_{II}$ aufheben. Dagegen sind jetzt die Potentiale der beiden Speisepunkte einander gleich, nämlich gleich \mathcal{E}_I — bzw. gleich \mathcal{E}_{II} —, und wir können nun die Punkte I und II aufeinander legen. Wir erhalten so die Darstellung der Fig. 74, aus der ersichtlich ist, dass sich über die Stromverteilung, wie sie sich bei gleichen Speisepunktsspannungen ausbilden würde — wir wollen die unter dieser Voraussetzung von I und II gelieferten Teilströme mit J_I' und J_{II}' bezeichnen —, noch ein Strom J_{III} lagert, der durch die EMK ε_{II} im ganzen Widerstande π des Leitungsstranges hervorgerufen wird. Ist, wie in den Fig. 72 bis 74, $\varepsilon_{II} > 0$, also $\mathcal{E}_I > \mathcal{E}_{II}$, so verläuft der Strom J_{III} von I nach II , ist also ebenfalls positiv und verstärkt den Strom J_I' , während er den Strom J_{II}' schwächt. Ist

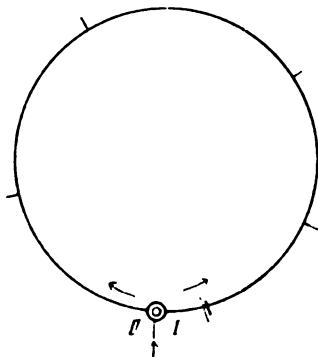


Fig. 74.

$\varepsilon_{II} < 0$, $\mathcal{E}_{II} > \mathcal{E}_I$, so verläuft J_{III} negativ, d. h. von II nach I und verstärkt durch seine Überlagerung den Strom J_{II}' , schwächt dagegen den Teilstrom J_I' . Wir können also in beiden Fällen für die wirklich von den Speisepunkten zu liefernden Ströme schreiben:

$$\left. \begin{aligned} J_I &= J_I' + J_{III} \\ J_{II} &= J_{II}' - J_{III} \\ J_I + J_{II} &= J_I' + J_{II}' = \sum_1^n i_r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (116)$$

wenn

$$J_{III} = \varepsilon_{II} g = \frac{\varepsilon_{II}}{\pi} \quad \text{und} \quad \varepsilon_{II} = \mathcal{E}_I - \mathcal{E}_{II} \dots \dots (117)$$

J_I' und J_{II}' werden entsprechend der Voraussetzung gleichen Potentials der Speisepunkte nach Gleichung (XIX) [63] berechnet:

$$\left. \begin{aligned} J_I' &= \frac{1}{\pi} \sum_1^n i_r \pi_{Ir} = \sum_1^n i_{rI} \\ J_{II}' &= \frac{1}{\pi} \sum_1^n i_r \pi_{I'r} = \sum_1^n i_{rII} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (118)$$

bzw. bei konstantem Querschnitt nach Gleichung (XXI):

$$\left. \begin{aligned} J_I' &= \frac{1}{l} \sum_1^n i_r l_{Ir} = \sum_1^n i_{rI} \\ J_{II}' &= \frac{1}{l} \sum_1^n i_r l_{I'r} = \sum_1^n i_{rII} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (118a)$$

Durch diese Gleichungen ist die Stromverteilung bei bekanntem ε_I , ε_{II} , i und w bzw. l eindeutig bestimmt.

Für die Spannungsverteilung erhalten wir durch Anwendung des zweiten KIRCHHOFFSchen Satzes auf Fig. 74, wie früher [63]:

$$\left. \begin{aligned} J_I w_{I1} + \sum_2^n J_{v-1,v} w_{v-1,v} - J_{II} w_{II n} &= \varepsilon_{III} \\ \sum_1^n i_v w_{Iv} - J_{II} w &= \sum_1^n i_v w_{IIv} - J_I w = \varepsilon_{III} \end{aligned} \right\} \dots (119)$$

oder

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= J_I w_{I1} + \sum_2^k J_{v-1,v} w_{v-1,v} \\ &= J_{II} w_{II n} + \sum_n^{k+1} J_{v,v-1} w_{v,v-1} + \varepsilon_{III} \\ \text{wenn } \varepsilon_I > \varepsilon_{II} \text{ und} \\ \varepsilon &= J_{II} w_{II n} + \sum_n^{k+1} J_{v,v-1} w_{v,v-1} \\ &= J_I w_{I1} + \sum_2^k J_{v-1,v} w_{v,v-1} + \varepsilon_{III} \\ \text{wenn } \varepsilon_{II} > \varepsilon_I. \end{aligned} \right\} \dots (120)$$

k ist wieder durch die Bedingung bestimmt:

$$\sum_1^{k-1} i_v < J_I \leq \sum_1^k i_v \quad \text{oder} \quad \sum_1^{k+1} i_v \leq J_{II} < \sum_1^k i_v.$$

Die Gleichungen (116) bis (120) umfassen auch die Gleichungen (112) bis (XX), da ja ε_{III} und J_{III} für $\varepsilon_I = \varepsilon_{II}$ verschwinden. Zugleich ist der Fall des ungleichen Potentials zweier Speisepunkte damit auf den bekannten Fall gleichen Potentials zurückgeführt.

Die graphische Darstellung der Ströme und Spannungsverluste nach den Gleichungen (116) und (119) erfolgt genau wie im Abschnitt [66] für äquipotentielle Speisepunkte, nur muss schliesslich zur Stromverteilung der Strom J_{III} , zur Spannungsverteilung die Spannung ε_{III} hinzugefügt werden.

Die im vorhergehenden Abschnitt mit J_I' und J_{II}' bezeichneten Summen der Teilströme von $i_1, i_2 \dots$ [65], die den verschiedenen Abnahmestellen von I bzw. II her zufließen, können, ohne an der Strom- und Spannungsverteilung etwa sonst noch vorhandener Leitungen etwas zu ändern, auch unmittelbar bei I und II abgezweigt werden, oder anders ausgedrückt: die Belastungsströme können nach den Speisepunkten verlegt werden, ohne dass dadurch die Strom- und Spannungsverhältnisse der Speisepunkte selbst und der übrigen Leitungen geändert würden, kürzer: sie können äquipotentiell nach den Speisepunkten verlegt werden (Fig. 75). Denn der infolge der Potentialdifferenz ε_{III} entstehende Ausgleichstrom J_{III} wird von der Verlegung der Belastungen nicht berührt, bleibt also nach wie vor bestehen; die Summe der Abzweigungen und des Leitungsstromes ergibt also, wie ein Blick auf Fig. 75 lehrt, nach der Verlegung den gleichen Wert wie vorher. Bleiben aber die Ströme in den übrigen Leitern ungeändert, so bleibt auch das

69.
Äquipoten-
tielle Ver-
legung der
Belastungen.

Potential in I und II das gleiche, auch wenn von der früher gemachten Voraussetzung Abstand genommen wird, dass die Speisepunkte unmittelbar mit Stromquellen unveränderlichen Potentials verbunden sind.

Wir können aber noch weiter gehen und die Belastungen einer oder mehrerer Abzweigungen auf irgend zwei andere Punkte äquipotentiell übertragen¹⁾ und dadurch die ersteren entlasten. Soll beispielsweise i_2 auf die Punkte 1 und 3 verlegt werden, so ist nach [65] Gleichung (115a) i_2 im

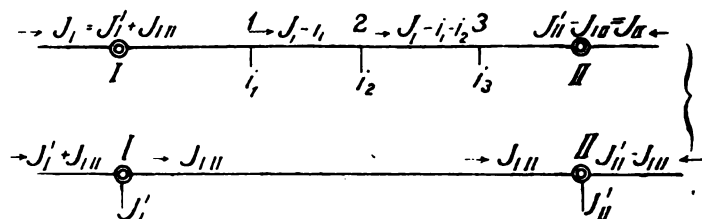


Fig. 75.

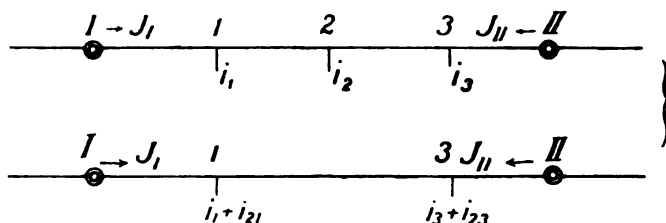


Fig. 76.

umgekehrten Verhältnis der Längen 12 und 23, gleichen Querschnitt des Leitungsstranges vorausgesetzt, zu zerlegen, also

$$\frac{i_{21}}{i_{23}} = \frac{l_{23}}{l_{21}} \quad \text{oder} \quad i_{21} = \frac{l_{23}}{l_{13}} i_2, \quad i_{23} = \frac{l_{12}}{l_{13}} i_2$$

und i_{21} nach 1, i_{23} nach 3 zu übertragen und zu den dort vorhandenen Strömen zu addieren (Fig. 76). Dann erhalten wir als neue Stromverteilung in I unter Berücksichtigung der Gleichung (115a):

$$\begin{aligned} & J_{III} + (i_1 + i_{21}) \frac{l_{III}}{l_{1III}} + (i_3 + i_{23}) \frac{l_{III}}{l_{1III}} \\ &= J_{III} + i_{1I} + \frac{i_2}{l_{1III}} \left(l_{1II} \frac{l_{23}}{l_{13}} + l_{3II} \frac{l_{12}}{l_{13}} \right) + i_{3I} \\ &= J_{III} + i_{1I} + i_{2I} + i_{3I} \\ &= J_I' + J_{III} = J_I, \end{aligned}$$

da ja der Klammerausdruck

$$l_{1II} \frac{l_{23}}{l_{13}} + l_{3II} \frac{l_{12}}{l_{13}} = (l_{12} + l_{2II}) \frac{l_{23}}{l_{13}} + (l_{2II} - l_{23}) \frac{l_{12}}{l_{13}} = l_{2II}$$

¹⁾ Vgl. O. FRICK: Ein einfaches Verfahren ... Z. f. E. 1894, S. 265.

ist. Die Stromverteilung in I ist also die gleiche geblieben wie vor der Verlegung und ebensowenig ändert sich diejenige in III , wie in ähnlicher Weise leicht gezeigt werden kann. Infolgedessen bleiben auch die Potentiale der Punkte 1 und 3 durch die Verlegung unberührt. Dagegen erhält der Strom in der Strecke 13 einen anderen Wert wie vorher; es wird

$$J_{13} = J_I - i_1 - i_{21} = J_{III} + i_{23} + i_3 - J_{II}' = -(J_{II} - i_3 - i_{23}) = -J_{31},$$

da ja nach Gleichung (116)

$$J_I = J_I' + J_{III} = J_{III} + \sum_1^n i_v - J_{II}'.$$

Die allgemeine Formel für die Stromzerlegung einer Belastung i_k , die auf die Punkte μ und ν ($\mu < k < \nu$) zu übertragen ist, lautet also:

$$\left. \begin{aligned} i_{k\mu} &= \frac{w_{k\nu}}{w_{\mu\nu}} i_k \text{ bzw. } = \frac{l_{k\nu}}{l_{\mu\nu}} i_k \\ i_{k\nu} &= \frac{w_{k\mu}}{w_{\mu\nu}} i_k \text{ bzw. } = \frac{l_{k\mu}}{l_{\mu\nu}} i_k \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (\text{XXV})$$

Es soll die in Fig. 77 gegebene Stromverteilung auf die Punkte I , 1, 2 und II übertragen und nachgewiesen werden, dass die Potentiale dieser Punkte sich durch die Übertragung nicht ändern. Beispiel.

Die Punkte I und II seien Speisepunkte von gleichem Potential, die Punkte 1 und 2 etwa Strassenkreuzungen, an denen von dem Hauptkabel

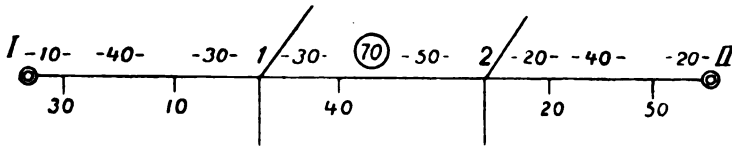


Fig. 77.

noch andere Leitungen abzweigen. Die Zahlen an den Leitungen bedeuten, wie gewöhnlich, deren Längen in Metern, diejenigen an den Abzweigungsstrichen Stromstärken in Ampere. Der Querschnitt des Kabels ist überall der gleiche, und zwar gleich 70 mm^2 . Nach Gleichung (XXI) [63] wird vor der Verlegung der Ströme

$$J_I = \frac{1}{l} \sum_1^n i_v l_{Iv}; \quad J_{II} = \frac{1}{l} \sum_1^n i_v l_{Iv}.$$

Wir erhalten:

30 · 10 = 300	30 · 230 = 6900
10 · 50 = 500	10 · 190 = 1900
40 · 110 = 4400	40 · 130 = 5200
20 · 180 = 3600	20 · 60 = 1200
50 · 220 = 11000	50 · 20 = 1000
19800 : 240	16200 : 240
$J_I = 82.5$	$J_{II} = 67.5 = \sum i - J_I.$

Ferner wird, da nach Gleichung (XXII)

$$\epsilon_r = \frac{e}{q} (J_I l_{r1} + \sum_2^r J_{r-1,r} l_{r-1,r}),$$

67.5 · 10 = 675	82.5 · 20 = 1650
37.5 · 40 = 1500	32.5 · 40 = 1300
27.5 · 30 = 825	12.5 · 20 = 250
3000	3200

$$\epsilon_1 = \frac{3000 \cdot 0.018}{70} = 0.772 \quad \epsilon_2 = \frac{3200 \cdot 0.018}{70} = 0.823.$$

Verlegen wir nun die Belastungen auf *I*, 1, 2 und *II*, so wird gemäss Gleichung (XXV) der Reihe nach:

	<i>I</i>	1	2	<i>II</i>
$\frac{70}{80} \cdot 30 =$	26.25	3.75	—	—
$\frac{30}{80} \cdot 10 =$	3.75	6.25	—	—
$\frac{50}{80} \cdot 40 =$	—	25.00	15.00	—
$\frac{60}{80} \cdot 20 =$	—	—	15.00	5.00
$\frac{20}{80} \cdot 50 =$	—	—	12.50	37.50
	$i_I = 30.00$	$i_1 = 35.00$	$i_2 = 42.50$	$i_{II} = 42.50$

Wir erhalten also als neue Stromverteilung die der Fig. 78 und berechnen daraus die Ströme in den Leitungen zu

$$J_{I1} = 37.5; \quad J_{12} = 2.5; \quad J_{II2} = 40.0.$$

Daher wird

$$\epsilon_1 = \frac{37.5 \cdot 80}{70} \cdot 0.018 = 0.772 \quad \text{und} \quad \epsilon_2 = \frac{40.0 \cdot 80}{70} \cdot 0.018 = 0.823$$

wie oben. Die beiden betrachteten Stromverteilungen sind also in bezug auf die Spannungsverluste bzw. Potentiale von 1 und 2 vollständig gleichwertig.

70. Wie die Vergleichung der Formeln (XXV) und (114) lehrt, geschieht die Verlegung der Belastungen genau so, als ob diejenigen Punkte, auf die die Lasten verlegt werden, gleiches Potential besässen. Wir können uns daher die ursprüngliche Stromverteilung der Fig. 79, bei der die Potentiale der Speisepunkte *I* und *II* verschieden sein sollen, auch so entstanden denken, dass wir zunächst denjenigen Punkten, auf die die Belastungen verlegt werden sollen — hier *I*, 2, 4 und *II* — das gleiche Potential, etwa ϵ_I , erteilen und die Stromverteilung nach Gleichung (114) vornehmen (Fig. 80), ausserdem aber nach dem vorhergehenden Abschnitt die ursprüngliche Spannungsverteilung wieder dadurch hervorrufen, dass wir einerseits die Punkte 2 und 4

70.
Verlegung
der
Belastungen
und Über-
lagerung
zweier
Stromver-
teilungen.

mit den ihnen in Fig. 80 zugeführten Strömen belasten,¹⁾ andererseits den den Spannungsverlust $\varepsilon_{I II}$ verursachenden Strom $J_{I II} = \varepsilon_{I II} g_{I II}$ in die Leitung einführen (Fig. 81). Aus dieser Stromverteilung werden dann die bei I und II zuzuführenden Ströme J_I' und J_{II}'' berechnet, so dass die Stromverteilung der Fig. 82 entsteht. Die Überlagerung der beiden Stromvertei-

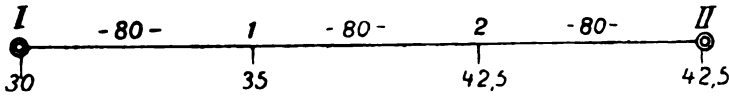


Fig. 78.

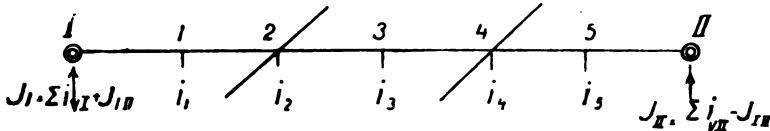


Fig. 79.

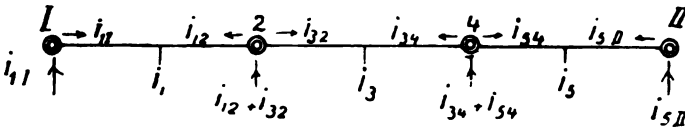


Fig. 80.

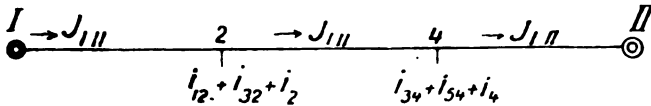


Fig. 81.

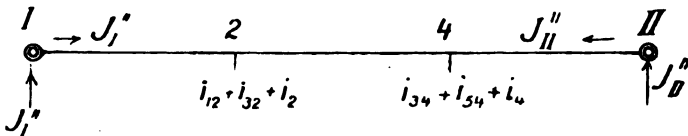


Fig. 82.

lungen (Fig. 80 u. 82) giebt offenbar die ursprünglich der Fig. 79, wie aus der Beweisführung in [69] hervorgeht.

Nehmen wir wieder die Stromverteilung der Fig. 79, nur betrage die Potentialdifferenz zwischen I und II 1 Volt. Dann ergibt sich als Stromverteilung bei gleichen Potentialen in den Punkten I , 1, 2 und II die in Fig. 83 eingezeichnete, während Fig. 84 die der ursprünglichen Spannungsverteilung entsprechende Belastung darstellt, da

Beispiel.

$$\varepsilon_{I II} g_{I II} = 1 \cdot \frac{70}{240 \cdot 0.018} = 16.2.$$

Es sind also bei I $37.5 + 16.2 = 53.7$ und bei II $40.0 - 16.2 = 23.8$ Amp.

1) TRICHMÖLLER: Elektrische Leitungsnetze.

zuzuführen und es entsteht die Stromverteilung der Fig. 85, die als Spannungsverluste in 1 und 2

$$\varepsilon_1 = \frac{53.7 \cdot 80 \cdot 0.018}{70} = 1.104;$$

$$\varepsilon_2 = 1.104 + \frac{18.7 \cdot 80 \cdot 0.018}{70} = 1.489$$

oder auch

$$= \varepsilon_{I II} + \frac{23.8 \cdot 80 \cdot 0.018}{70} = 1.489$$

gieht. Die Überlagerung von Fig. 83 und 85 ist als wahre Stromverteilung in Fig. 86 dargestellt. Der Spannungsverlust in 1 und 2 berechnet sich zu

$$\varepsilon_1 = \frac{0.018}{70} (83.7 \cdot 10 + 53.7 \cdot 40 + 43.7 \cdot 30) = 1.104$$

$$\varepsilon_2 = 1.104 + \frac{0.018}{70} (43.7 \cdot 30 + 3.7 \cdot 50) = 1.489$$

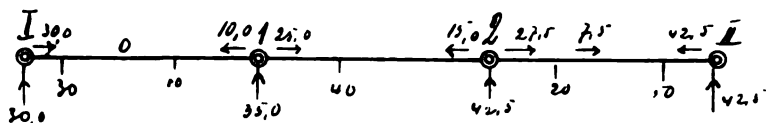


Fig. 83.

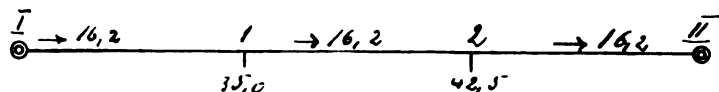


Fig. 84.

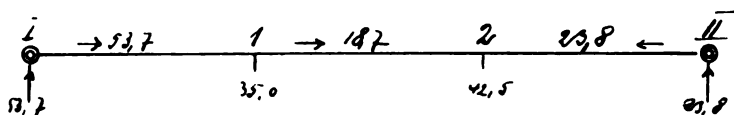


Fig. 85.

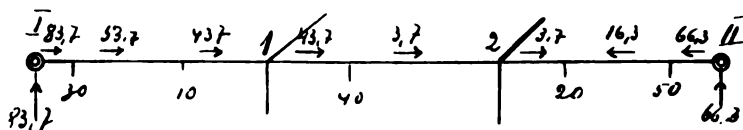


Fig. 86.

wie vorher. Der grösste Spannungsverlust findet bei der Belastung 20 Amp. zwischen 2 und II statt und beträgt von I aus:

$$\varepsilon_{Im} = 1.489 + \frac{3.7 \cdot 20 \cdot 0.018}{70} = 1.508,$$

von II aus:

$$\varepsilon_{II m} = \frac{0.018}{70} (66.3 \cdot 20 + 16.3 \cdot 40) = 0.509.$$

Ihre Differenz und damit auch die Differenz der Potentiale in I und II beträgt, wie vorausgesetzt, 1 Volt.

Die in dem vorhergehenden Abschnitt behandelte Verlegung der ver-
teilten Belastungen auf bestimmte ausgezeichnete Punkte können wir natürlich
auch auf die allgemeinen Netze anwenden und dadurch eine wesentliche Ver-

71.
Das all-
gemeine Netz
mit Knoten-
punkten.

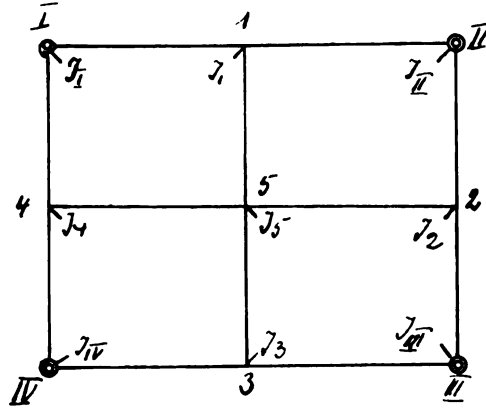


Fig. 87.

einfachung derselben erreichen. Wir haben zu diesem Zwecke also bestimmten Punkten, nämlich den Speise- und Knotenpunkten, zunächst gleiches Potential zu erteilen und die auf den Einzelstrecken verteilten Belastungen äquipotentiell auf sie zu übertragen. Dadurch erhalten wir aus einem allgemeinen Netz nach Fig. 65 [61] ein solches nach Fig. 87, in dem nur die Speise- und Knotenpunkte belastet sind. Unsere nächste Aufgabe ist also, in einem solchen Netz die Strom- und Spannungsverteilung zu bestimmen.

Gleichungsmethoden.

Wir betrachten zunächst wieder den einfachsten Fall, nämlich ein Netz,
das nur einen Knotenpunkt bei mehreren äquipotentiellen Speisepunkten ent-
hält (Fig. 88). Die Berechnung der Strom- und Spannungsverteilung in den

72.
Netz mit
einem Kno-
tenpunkt.

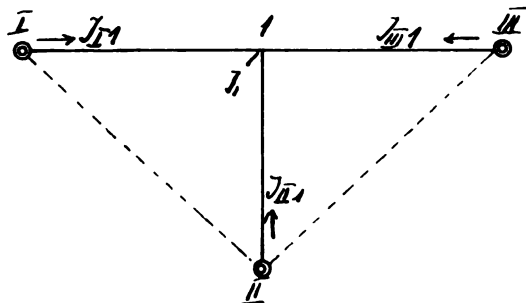


Fig. 88.

Leitungen besteht nun darin, entweder diejenigen Teilströme von J_1 zu be-
stimmen, welche von jedem Speisepunkte aus dem Knotenpunkt zufließen
(Strommethode), oder den Spannungsverlust ε_1 (Spannungsmethode). Die

Aufgabe kann also in zweifacher Weise gelöst werden; durch jede der beiden Lösungen ist die andere gegeben, da ja

$$\varepsilon_1 = w_{I1} J_{I1} = w_{II1} J_{II1} = w_{III1} J_{III1} \quad (121)$$

und andererseits

$$J_{I1} = g_{I1} \varepsilon_1; J_{II1} = g_{II1} \varepsilon_1; J_{III1} = g_{III1} \varepsilon_1 \quad (121a)$$

ist. Die Gleichungen, welche die Abhängigkeit der Leiterströme bzw. der Spannungsverluste von den Widerständen oder Leitfähigkeiten darstellen, erhalten wir nun auf folgendem Wege:

73.
Spannungs-
methode.
(Coltri-
Telch-
müller.)

Der erste KIRCHHOFFsche Satz, angewendet auf den Knotenpunkt 1, ergibt:

$$J_{I1} + J_{II1} + J_{III1} = J_1 \quad (122)$$

Legen wir ferner die Punkte *I*, *II* und *III* aufeinander [63], bzw. verbinden wir sie durch widerstandslose Leitungen miteinander, so liefert in den so

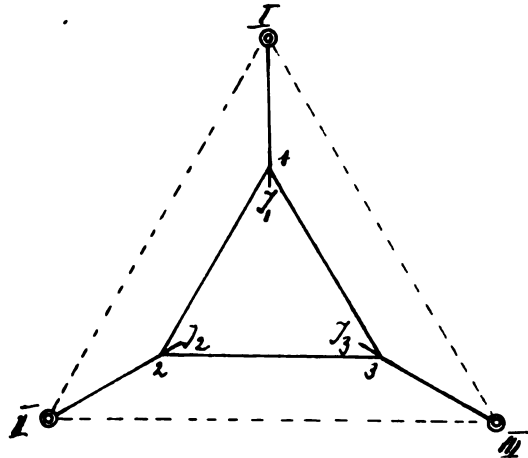


Fig. 89.

entstandenen geschlossenen Kreisen der zweite KIRCHHOFFsche Satz die Gleichungen

$$w_{I1} J_{I1} = w_{II1} J_{II1} = w_{III1} J_{III1} = \varepsilon_1 \quad (123)$$

Eliminieren wir aus diesen vier Gleichungen die Ströme J_{I1} , J_{II1} und J_{III1} und ersetzen wir die Widerstände durch die Leitfähigkeiten, so folgt:

$$(g_{I1} + g_{II1} + g_{III1}) \varepsilon_1 = J_1 \quad (124)$$

wodurch ε_1 bei gegebenen Leitfähigkeiten und bekannter Belastung, also bei einem vorliegenden Netz, bestimmt ist. Aus ε_1 und den Gleichungen (123) folgt schliesslich die Stromverteilung, d. h. die Werte J_{I1} , J_{II1} und J_{III1} .

74.
Strom-
methode.
(Schnitt-
methode von
Herzog-
Stark.)

Wir können aber auch von der Einführung des Spannungsverlustes ε_1 absehen und durch Lösung der drei Gleichungen (122) und (123) die Stromverteilung unmittelbar bestimmen. Wir erhalten durch Elimination von J_{III1}

$$\left. \begin{aligned} w_{I1} J_{I1} - w_{II1} J_{II1} &= 0 \\ w_{III1} J_{I1} + (w_{II1} + w_{III1}) J_{II1} &= w_{III1} J_1 \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

also zwei Gleichungen, aus denen die beiden Unbekannten J_{I1} und J_{II1} und mit Hilfe der Gleichungen (122) auch J_{III1} und ε_1 folgen.

Sind mehrere belastete Knotenpunkte vorhanden (Fig. 89), so ergibt sich die Aufstellung der Gleichungen in ganz ähnlicher Weise, und wir erhalten so die allgemeine Lösung des Problems der Spannungs- und Stromverteilung in einem geschlossenen Netz mit belasteten Knotenpunkten.

Für die Spannungsverteilung erhalten wir nach dem Vorhergehenden für Knotenpunkt 1:

$$J_{I1} + J_{21} + J_{31} = J_1$$

also

$$g_{I1} \varepsilon_1 + g_{12} \varepsilon_{21} + g_{31} \varepsilon_{31} = J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (126)$$

und in dem geschlossenen Kreise $I12II$

$$n_{I1} J_{I1} + n_{12} J_{12} + n_{II2} J_{2II} = 0$$

oder

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_{12} - \varepsilon_2 = 0,$$

woraus

$$\varepsilon_{12} = -\varepsilon_{21} = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

und ähnlich

$$\varepsilon_{31} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$$

$$\varepsilon_{23} = \varepsilon_3 - \varepsilon_2,$$

wie überhaupt allgemein

$$\varepsilon_{\mu\nu} = -\varepsilon_{\nu\mu} = \varepsilon_\nu - \varepsilon_\mu \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XXVI)$$

ist; denn nach der Definition [62] ist

$$\varepsilon_{\mu\nu} = \mathcal{E}_\mu - \mathcal{E}_\nu.$$

Addiert man hierzu die identische Gleichung $\mathcal{E} - \mathcal{E} = 0$, so wird:

$$\varepsilon_{\mu\nu} = (\mathcal{E} - \mathcal{E}_\nu) - (\mathcal{E} - \mathcal{E}_\mu) = \varepsilon_\nu - \varepsilon_\mu.$$

Aus den Gleichungen (126) und (XXVI) erhalten wir nun für Knotenpunkt 1:

$$(g_{I1} + g_{12} + g_{13}) \varepsilon_1 - g_{12} \varepsilon_2 - g_{13} \varepsilon_3 = J_1$$

und in gleicher Weise ergeben sich für die andern Knotenpunkte die Gleichungen:

$$-g_{21} \varepsilon_1 + (g_{II2} + g_{21} + g_{23}) \varepsilon_2 - g_{23} \varepsilon_3 = J_2$$

$$-g_{31} \varepsilon_1 - g_{32} \varepsilon_2 + (g_{III3} + g_{32} + g_{31}) \varepsilon_3 = J_3,$$

oder wenn wir die Summen der in einem Knotenpunkte ν zusammenlaufenden Leitfähigkeiten mit $g_{\nu\nu}$ bezeichnen, also

$$g_{\nu\nu} = g_{\nu 1} + g_{\nu 2} + \cdots + g_{\nu, \nu-1} + g_{\nu, \nu+1} + \cdots + g_{\nu n}$$

setzen, so lautet das Gleichungssystem zur Bestimmung der Spannungsverluste ε_ν in den Knotenpunkten:

75.
Netze mit
mehreren
Knoten-
punkten.

76.
Spannungs-
methode.

$$\left. \begin{aligned} g_{11} \varepsilon_1 - g_{12} \varepsilon_2 - g_{13} \varepsilon_3 &= J_1 \\ -g_{21} \varepsilon_1 + g_{22} \varepsilon_2 - g_{23} \varepsilon_3 &= J_2 \\ -g_{31} \varepsilon_1 - g_{32} \varepsilon_2 + g_{33} \varepsilon_3 &= J_3 \end{aligned} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad (127)$$

und zwar ist $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$.

In den praktischen Netzen sind niemals alle Verbindungen zwischen den einzelnen Knotenpunkten vorhanden, es ist nicht jeder Knotenpunkt mit allen anderen unmittelbar verbunden, sondern nur mit den nächstliegenden, während die direkten Verbindungen mit den anderen Knotenpunkten fehlen, z. B. die Verbindungen 12, 13, 14 u. s. f. in Fig. 87 (S. 107). In diesem Falle ist die der fehlenden Verbindung $x\lambda$ entsprechende Leitfähigkeit $g_{x\lambda} = 0$ einzusetzen, da ja der Widerstand $w_{x\lambda} = \infty$ ist.

Wir haben also entsprechend den drei Knotenpunkten drei unabhängige Gleichungen ersten Grades mit drei Unbekannten, so dass das Problem der Spannungsverteilung in den Knotenpunkten eindeutig gelöst ist.

In der gleichen Form würde sich allgemein das folgende System von n Gleichungen für n belastete Knotenpunkte ergeben:

$$\left. \begin{aligned} g_{11} \varepsilon_1 - g_{12} \varepsilon_2 - \dots - g_{1r} \varepsilon_r - \dots - g_{1n} \varepsilon_n &= J_1 \\ -g_{21} \varepsilon_1 + g_{22} \varepsilon_2 - \dots - g_{2r} \varepsilon_r - \dots - g_{2n} \varepsilon_n &= J_2 \\ . &. \\ -g_{r1} \varepsilon_1 - g_{r2} \varepsilon_2 - \dots + g_{rr} \varepsilon_r - \dots - g_{rn} \varepsilon_n &= J_r \\ . &. \\ -g_{n1} \varepsilon_1 - g_{n2} \varepsilon_2 - \dots - g_{nr} \varepsilon_r - \dots + g_{nn} \varepsilon_n &= J_n \end{aligned} \right\} \quad (\text{XXVII})$$

woraus sich der Spannungsverlust im Knotenpunkt ν berechnet zu

$$\varepsilon_r = \frac{D_{r1} J_1 + D_{r2} J_2 + \dots + D_{rn} J_n}{D}, \quad (128)$$

wenn unter D die Determinante des Systems und unter $D_{\mu\nu}$ die Unterdeterminante des $\mu\nu^{\text{ten}}$ Gliedes der Determinante verstanden wird, wenn also

$$D = \begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1r} & \cdots & -g_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{r1} & -g_{r2} & \cdots & g_{rr} & \cdots & -g_{rn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & -g_{nr} & \cdots & g_{nn} \end{vmatrix}$$

$$\text{und } D_{\mu r} = (-1)^{\mu+r} \begin{vmatrix} g_{11} & \cdots & -g_{1,r-1} & \cdots & g_{1,r+1} & \cdots & -g_{1n} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ -g_{\mu-1,1} & \cdots & -g_{\mu-1,r-1} & \cdots & -g_{\mu-1,r+1} & \cdots & -g_{\mu-1,n} \\ -g_{\mu+1,1} & \cdots & -g_{\mu+1,r-1} & \cdots & -g_{\mu+1,r+1} & \cdots & -g_{\mu+1,n} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ -g_{n1} & \cdots & -g_{n,r-1} & \cdots & -g_{n,r+1} & \cdots & -g_{nn} \end{vmatrix}$$

Das Bildungsgesetz der Determinantenglieder ist einfach: Die g_{vv} sind die positive Summe der in dem Knotenpunkt v zusammenlaufenden Leitfähigkeiten, die $g_{\mu v}$ sind die Leitfähigkeiten der unmittelbaren Verbindungsleitungen der Knotenpunkte μ und v , also an sich ebenfalls positive Grössen oder gleich Null und es ist

$$g_{\mu v} = g_{v \mu}.$$

Die Determinante D ist also symmetrisch zur Hauptdiagonalreihe, und die Glieder der Hauptdiagonale sind mindestens gleich oder grösser als die Summe der absoluten Werte der Glieder der entsprechenden Reihe oder Säule, Eigenschaften, die, wie wir später sehen werden, die rechnerische Auswertung der Unbekannten sehr erleichtern.

Aus den ermittelten Spannungsverlusten ergibt sich schliesslich die Stromverteilung, und zwar wird:

$$J_{\mu v} = \varepsilon_{\mu v} g_{\mu v} = \frac{\varepsilon_{\mu v}}{w_{\mu v}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (129)$$

Die Reihenfolge der Kennziffern zeigt zugleich die Stromrichtung an.

Das Gleichungssystem (XXVII), welches die Spannungsverluste der Knotenpunkte abhängig von den Leitfähigkeiten bzw. Widerständen der Leiter darstellt, ist zuerst von TEICHMÜLLER¹⁾ aufgestellt worden; gleichzeitig wurden von COLTRI²⁾ ähnliche Gleichungen entwickelt, in denen an Stelle der Spannungsverluste die Potentiale der Knotenpunkte als Unbekannte benutzt wurden. Die erste Form hat vor der letzteren den wesentlichen Vorzug, dass in den Rechnungen die etwa 100 mal so kleinen Zahlen der Spannungsverluste auftreten, daher eine wesentlich grössere Genauigkeit mit geringerem Rechenaufwand erreicht werden kann. Die Anwendbarkeit des Rechenschiebers bei der gebräuchlichen Genauigkeit von etwa 1% wird erst durch die hier benutzte TEICHMÜLLERSche Form der Gleichungen ermöglicht.

Betrachten wir nunmehr die Leiterströme als Unbekannte, deren Abhängigkeit von den bekannten Leitungswiderständen und den gegebenen Belastungsströmen vermittelt der KIRCHHOFFSchen Regeln abgeleitet werden soll, so sehen wir bald, dass wir mehr Gleichungen aufstellen können als Unbekannte vorhanden sind. In dem konkreten Falle der Fig. 89 (S. 108) haben wir sechs Unbekannte, nämlich die Leiterströme J_{I1} , J_{II1} , J_{III1} , J_{12} , J_{23} , J_{31} , mit denen wir für die drei Knotenpunkte nach dem ersten KIRCHHOFFSchen Satz die drei Gleichungen bilden können:

$$\left. \begin{aligned} J_{I1} + J_{21} + J_{31} &= J_1 \\ J_{II2} + J_{12} + J_{32} &= J_2 \\ J_{III3} + J_{13} + J_{23} &= J_3 \end{aligned} \right\} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (130)$$

Ferner können wir sieben geschlossene Kreise bilden, nämlich $I12II$, $II23III$, $III31I$, 123 , $I132II$, $II213III$ und $III321I$, die vermittelt des zweiten KIRCHHOFFSchen Gesetzes sieben weitere Gleichungen von der Form geben:

$$w_{I1} J_{I1} + w_{12} J_{12} + \dots = 0.$$

1) TEICHMÜLLER: Über die Stromverteilung in elektrischen Leitungsnetzen, ETZ 1893, S. 537, sowie Elektrische Leitungsnetze.

2) COLTRI: Über die Stromverteilung in Leitungsnetzen, ETZ 1893, S. 425.

Diese zehn Gleichungen für unsere sechs Unbekannten sind natürlich nicht voneinander unabhängig, sondern die Gleichungen der zusammengesetzten Figuren folgen, wie leicht ersichtlich, durch Addition aus den Gleichungen der einfachen Kreise, also der Maschen, aus denen sie gebildet sind. Auch von den vorhandenen vier Maschen ist noch die Gleichung je einer Masche aus denen der übrigen durch entsprechende Kombination zu erhalten und nur drei von ihnen sind unabhängig voneinander und geben zusammen mit

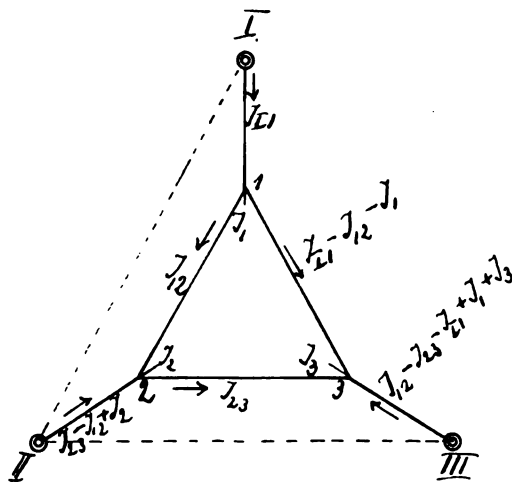


Fig. 90.

den nach dem ersten KIRCHHOFF'schen Satz erhaltenen Gleichungen (130) die sechs zur Bestimmung der Unbekannten nötigen Gleichungen. Welche der vier möglichen Kombinationen der vorhandenen vier Maschen zu je dreien gewählt wird, ist gleichgültig; jede einzelne derselben genügt zur Lösung der Aufgabe.

Werden nun drei der sechs Unbekannten vermittelt der Gleichungen (130) eliminiert, so bleiben noch drei Unbekannte und zu ihrer Bestimmung die drei nach dem Vorhergehenden zu bildenden Gleichungen, die die Abhängigkeit der Unbekannten von den Leiterwiderständen und den Belastungs-

strömen ausdrücken. Werden also beispielsweise die Ströme J_{I1} , J_{I2} und J_{I3} als Unbekannte gewählt, so berechnen sich die übrigen Leiterströme aus den Gleichungen (130) zu

$$\begin{aligned} J_{I3} &= J_{I1} - J_{I2} - J_1 \\ J_{II2} &= J_{I2} - J_{I1} + J_2 \\ J_{III3} &= J_{I2} - J_{I3} - J_{I1} + J_1 + J_3 \end{aligned}$$

(Fig. 90), und wir erhalten aus den drei Maschen $I12$, $II23$ und $I23$ die Gleichungen:

$$\left. \begin{aligned} w_{I1} J_{I1} + (w_{I2} + w_{II2}) J_{I2} - w_{II2} J_{I3} &= w_{II2} J_2 \\ w_{III3} J_{I1} - (w_{II2} + w_{III3}) J_{I2} + (w_{II2} + w_{23} + w_{III3}) J_{I3} &= w_{III3} (J_1 + J_3) - w_{II2} J_2 \\ - w_{I3} J_{I1} + (w_{I2} + w_{I3}) J_{I2} + w_{23} J_{I3} &= - w_{I3} J_1 \end{aligned} \right\} \quad (131)$$

durch die die Stromverteilung des Netzes bestimmt wird.¹⁾

Ist allgemein ein Halbnetz von l Leitern und k Knotenpunkten gegeben, so können wir zunächst k der l unbekannten Leiterströme eliminieren, indem

1) Diese Methode der Netzberechnung ist zuerst von HERZOG und STARK (ETZ 1890, S. 221 und 445: Über die Stromverteilung in Leitungszusammenschlüssen) angegeben und mit dem Namen der Schnittmethode bezeichnet worden, da sich in den Punkten des größten Spannungsverlustes die Leitungen aufschneiden lassen, ohne die Stromverteilung zu ändern.

wir auf die k Knotenpunkte den ersten Satz von KIRCHHOFF anwenden. Es sind daher im allgemeinen Fall $l - k$ Gleichungen zwischen den $l - k$ unbekannten Leiterströmen und den bekannten Leitungswiderständen und Belastungsströmen zu bilden, indem der zweite KIRCHHOFFsche Satz auf $l - k$ einfache Maschen angewendet wird. Auch hier ist das Bildungsgesetz der Gleichungen, nachdem einmal die Ströme in den Leitern als Summen von unbekannten Leitungs- und bekannten Belastungsströmen festgelegt sind, einfach, so dass die Gleichungen sofort hingeschrieben werden können. Das Bildungsgesetz lässt sich in der folgenden Form aussprechen: Umkreist man eine Masche in irgend einer Richtung, so ist die algebraische Summe der Spannungsverluste, hervorgerufen von den unbekannten Strömen, gleich der algebraischen Summe der Spannungsverluste, hervorgerufen von den bekannten Belastungsströmen, wenn die Masche in entgegengesetzter Richtung umkreist wird.

Das Resultat, nämlich die gesuchten Leiterströme, erhalten wir demnach wieder in der Form

$$J_{\mu\nu} = \frac{\sum D_{\mu\nu} w J}{D},$$

worin D die aus dem System der $l - k$ Gleichungen gebildete Determinante, $D_{\mu\nu}$ die Unterdeterminante des $\mu\nu$ ten Gliedes derselben bedeutet.

Wie leicht ersichtlich, ist aber die Nenner-Determinante nicht symmetrisch in bezug auf ihre Hauptdiagonalreihe und ebensowenig sind notwendigerweise die Glieder der Hauptdiagonale gleich oder grösser als die Summe der absoluten Werte der Glieder der entsprechenden Reihe oder Säule. Es giebt zwar eine andere Methode, die Maschenmethode von MAXWELL,¹⁾ die vermöge einer besonderen Zerlegung der Leiterströme in die Maschen umkreisende Ströme zu Gleichungen mit symmetrischer Determinante gelangt; wir können jedoch davon absehen, diese Methode in den Kreis unserer Betrachtungen zu ziehen, da sie voraussetzt, dass das vollständige Netz, also beide Netzhälften samt Belastungswiderständen und Stromquellen, in einer Ebene ausgebreitet werden kann, ohne dass die Leiter einander schneiden, eine Voraussetzung, die bei praktischen Netzen nicht allgemein verwirklicht werden kann.

Die praktische Auflösung der Gleichungen.

Wir haben also in beiden Fällen, ob wir nun die Leiterströme oder die Spannungsverluste in den Knotenpunkten als Unbekannte auffassen, das Resultat in der Form eines Quotienten zweier Determinanten erhalten, von denen die Zähler-Determinante aus der Nenner-Determinante dadurch abgeleitet wird, dass die der Ordnungszahl der Unbekannten entsprechende, also etwa die ν te Säule durch die bekannten Werte der rechten Seiten der Gleichungen ersetzt werden, wobei vorausgesetzt ist, dass die Gleichungen in der Normalform gegeben sind:

78.
Allgemeines
über die
ein-
schlägigen
Verfahren.

1) J. A. FLEMING: Phil. Mag. Bd. XX, S. 221, 1885; HERZOG-STARK: ETZ 1890, S. 445, sowie HERZOG-FELDMANN: Elektrische Leitungsnetze; W. FEUSSNER: Über Stromverzweigung in netzförmigen Leitern, Annalen der Physik, Bd. IX, S. 1304, 1902.

3) R. MEHMKE: Über das SEIDELSCHE Verfahren . . . *Math. Sammlung der Moskauer math. Gesellschaft*, Bd. XVI, N. 342, 1892.

auf Grund gewisser Vereinfachungen des Gleichungs- oder Determinantensystems eine schrittweise Ableitung der Determinanten höherer Ordnung aus denen niedriger Ordnung ermöglichen [JÜRGENS,¹⁾ VERHOECKX²⁾]. Beide Verfahren gestatten auf jeder Stufe in mehr oder weniger bequemer Weise eine Kontrolle bezüglich der Richtigkeit der Rechnung, eine Bedingung, die bei so umfangreichen Berechnungen für deren Zuverlässigkeit von fundamentaler Bedeutung ist.

Für die Anwendung des ersten Verfahrens, des GAUSSschen — oder des SEIDELschen, wie es vielfach bezeichnet wird —, ist Bedingung, dass die Diagonalglieder der Determinante des Systems gleich oder grösser sind, als die Summe der absoluten Werte der in der entsprechenden Reihe oder Säule stehenden übrigen Glieder, da hierauf die Konvergenz des Verfahrens beruht (vgl. JÜRGENS).¹⁾ Das zweite Verfahren, das von VERHOECKX, setzt eine in bezug auf die Hauptdiagonale symmetrische Form der Determinante voraus.

Es fragt sich zunächst, welches der beiden Gleichungssysteme vorzuziehen ist, dasjenige mit den Leiterströmen oder das mit den Knotenpunkts-Spannungsverlusten als Unbekannten. Unter sonst gleichen Verhältnissen wird natürlich dasjenige System zu bevorzugen sein, das die geringere Zahl von Gleichungen giebt, da ja die Schwierigkeit der Lösung mit der Zahl der Gleichungen wächst. Wie wir gesehen haben [77 u. 76], erhalten wir $l - k$ Gleichungen, falls wir die Ströme, k Gleichungen, falls wir die Spannungsverluste als Unbekannte einführen. Das erstere wird also vorzuziehen sein, wenn

$$l - k < k \quad \text{oder} \quad l < 2k$$

ist. Dies ist nun in praktischen Netzen fast nie der Fall, wie die folgende einfache Überlegung zeigt.

Enthält das Netz nur dreiseitige Knotenpunkte, und zwar neben k Knoten s Speisepunkte, so ist jedenfalls

$$l > \frac{3}{2} k,$$

denn in jedem Knoten laufen drei Leitungen zusammen (andernfalls wäre der Punkt ja kein Knotenpunkt) und jede Leitung gehört zwei Knotenpunkten an. Hierzu kommen dann noch die Leiter, die die Knoten mit den Speisepunkten verbinden.

Für vierseitige Knotenpunkte dagegen wird

$$l > \frac{4}{2} k, \quad \text{also} \quad l > 2k$$

und um so mehr natürlich bei mehr als vierseitigen Knoten. Nun enthalten die praktischen Netze aber nur selten dreiseitige, sondern meist vier- und mehrseitige Knoten, so dass also fast stets

$$l - k > k$$

1) E. JÜRGENS: Zur Auflösung linearer Gleichungssysteme, Aachen 1886.

2) P. M. VERHOECKX: Eine analytische und graphische Methode zur Berechnung von geschlossenen Leitungsnetzen, Z. f. E. 1904, S. 293, und L'Écl. électr. 1904, Nr. 16 und 17.

wird, und die Einführung der Spannungsverluste in den Knotenpunkten die geringere Zahl von Gleichungen giebt. Dazu kommt als ausschlaggebender Punkt, dass, wie bereits erwähnt [77], die Determinante des Gleichungssystems bei der Strommethode weder symmetrisch zur Hauptdiagonale ist, noch dass die Glieder der Hauptdiagonale gleich oder grösser als die Summe der absoluten Werte der Glieder der entsprechenden Reihe oder Säule sind, dass also

$$a_{r,r} \text{ nicht } \geq \sum |a_{n,r}|$$

und

$$a_{\mu\nu} > a_{\nu\mu}.$$

In diesem Falle ist man gezwungen, die Determinante nach den allgemeinen Regeln der Determinantentheorie auszuwerten oder sie nach einer von JÜRGENS angegebenen Methode (s. Fussnote 1, S. 115) so umzuformen, dass die erste Bedingung erfüllt wird. Diese Rechnung erspart man sich, wenn die Spannungsmethode angewandt wird.

Im folgenden sollen nun die erwähnten Rechnungsverfahren für die Spannungsmethode behandelt und an einem Beispiel erläutert werden.

80.
Gaussches
Näherungs-
verfahren.

Werden also die Spannungsverluste in den Knotenpunkten als Unbekannte eingeführt, so geht das allgemeine Gleichungssystem (132) in das bereits angeführte System (XXVII) [76] über:

$$\left. \begin{aligned} g_{11} \varepsilon_1 - g_{12} \varepsilon_2 - \dots - g_{1r} \varepsilon_r - \dots - g_{1n} \varepsilon_n &= J_1 \\ - g_{21} \varepsilon_1 + g_{22} \varepsilon_2 - \dots - g_{2r} \varepsilon_r - \dots - g_{2n} \varepsilon_n &= J_2 \\ \dots & \\ - g_{r1} \varepsilon_1 - g_{r2} \varepsilon_2 - \dots + g_{rr} \varepsilon_r - \dots - g_{rn} \varepsilon_n &= J_r \\ \dots & \\ - g_{n1} \varepsilon_1 - g_{n2} \varepsilon_2 - \dots - g_{nr} \varepsilon_r - \dots + g_{nn} \varepsilon_n &= J_n \end{aligned} \right\} \quad (\text{XXVII})$$

Hierin bedeutet also $g_{r\mu}$ die Leitfähigkeit des unmittelbaren Verbindungsleiters des μ^{ten} und r^{ten} Knotenpunktes, wobei etwa mehrfache parallele Verbindungen durch die äquivalente einfache Leitung zu ersetzen sind, und g_{rr} die Summe der Leitfähigkeiten der in r zusammenlaufenden Leiter. Die Bedingung für die Konvergenz des Näherungsverfahrens

$$g_{rr} = g_{r1} + g_{r2} + \cdots + g_{r,r-1} + g_{r,r+1} + \cdots + g_{rn}$$

ist hier erfüllt, da g_{rr} ausser den $g_{r\mu}$ noch die Leitfähigkeiten g_{rl} , g_{rH} ... enthält.

Sind Näherungswerte der Unbekannten bekannt, etwa a_1 für ε_1 , a_2 für $\varepsilon_2 \dots$
 a_r für ε_r , so setzt man

$$\varepsilon_p = a_p + \varepsilon_p'$$

und erhält aus (XXVII) das folgende Gleichungssystem:

$$-g_{r1}(a_1 + \varepsilon_1') - g_{r2}(a_2 + \varepsilon_2') - \dots - g_{rn}(a_n + \varepsilon_n') = J_r$$

oder

$$-g_{r1} \varepsilon_1' - g_{r2} \varepsilon_2' - \dots - g_{rr} \varepsilon_r' - \dots - g_{rn} \varepsilon_n'' = J_r' \quad (133)$$

worden ist, dass die Grösse $\frac{J_p^{(2)}}{g_{pp}}$ gegen ε_p vernachlässigt werden kann, erhält man schliesslich

$$\varepsilon_1 = a_1 + \sum \varepsilon_1'; \quad \varepsilon_2 = a_2 + \sum \varepsilon_2' \dots$$

Wie aus dem Vergleich der Gleichungssysteme (XXVII) und (133) ff. hervorgeht, ändern sich bei dieser Rechnung, abgesehen von den Akzenten der ε , die linken Seiten des Systems nicht, sondern nur die rechten. Man braucht also auch nur diese hinzuschreiben und kann sie in übersichtlicher Weise, ebenso wie die ε in einem entsprechenden Schema vereinigen.

Die Kontrolle der Rechnung ist sehr einfach. Denn setzt man irgend einen zusammengehörigen Satz von Werten der ε , z. B. den zu den Gleichungen (135) gehörigen

$$\varepsilon_1 = a_1 + \varepsilon_1'; \quad \varepsilon_2 = a_2 + \varepsilon_2'; \quad \dots \quad \varepsilon_k = a_k + \varepsilon_k' + \varepsilon_k''; \quad \varepsilon_l = a_l + \varepsilon_l' + \varepsilon_l'' \dots$$

in diese Gleichungen ein, so müssen die sich ergebenden rechten Seiten mit den zuletzt gefundenen J_p''' übereinstimmen. Ist dies aber etwa infolge ungenauer Rechnung nicht der Fall, so braucht man durchaus nicht den Rechenfehler aufzusuchen, sondern fährt mit den so erhaltenen richtigen J_p''' in der Rechnung fort.

Beispiel. Ein Beispiel wird das Verfahren am besten beleuchten. Es sei das Netz der Fig. 91 gegeben,¹⁾ in welchem die den Leitungen beigegeführten Zahlen die Leitfähigkeiten in Ω^{-1} , die an den Knotenpunkten mit Strichen bezeichneten die Belastungen in Ampere angeben. Die Leitfähigkeiten sind also:

$$\begin{array}{llll} g_{11} = 268.88 & g_{12} = 47.62 & g_{13} = 0 & g_{14} = 0 \\ & g_{22} = 338.04 & g_{23} = 142.84 & g_{24} = 0 \\ & & g_{33} = 320.90 & g_{34} = 106.64 \\ & & & g_{44} = 291.60 \end{array}$$

und die Gleichungen lauten:

$$\begin{array}{rcl} 268.88 \varepsilon_1 - 47.62 \varepsilon_2 & & = 100 \\ - 47.62 \varepsilon_1 + 338.04 \varepsilon_2 - 142.84 \varepsilon_3 & & = 100 \\ & - 142.84 \varepsilon_2 + 320.90 \varepsilon_3 - 106.64 \varepsilon_4 & = 100 \\ & & - 106.64 \varepsilon_3 + 291.60 \varepsilon_4 = 100. \end{array}$$

Das Netz soll einen Teil eines Zweileiternetzes darstellen, dessen Spannung $E = 110$ Volt, dessen maximaler Spannungsverlust ε also etwa 1 Volt beträgt. Wir können demnach in Anbetracht, dass bis zu den Knotenpunkten nur ein Teil des maximalen Spannungsverlustes auftritt, als ersten Näherungswert den Wert 0.5 wählen, so dass

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0.5$$

wird.

Ehe wir mit der Rechnung selbst beginnen, wollen wir uns über die Genauigkeit Rechenschaft geben, die wir bei der Auswertung der ε erreichen wollen. In Anbetracht der im allgemeinen bei den Netzberechnungen herrschen-

¹⁾ Aus TEICHMÜLLER: Sammlung von Aufgaben, Leipzig 1902.

den Unsicherheiten der Annahmen wird es vollauf genügen, wenn die ε auf 1% genau ermittelt werden. Für gewöhnlich genügt eine geringere Genauigkeit. Wir werden also, da die ε um 1 herum liegen, noch die dritte Dezimale in der Rechnung mitführen, um sie bei der schliesslichen Summe zur genauen Bestimmung der zweiten Dezimale benutzen zu können. Nun haben die g_{vv} die Grössenordnung 100. Wollen wir also durch Division mit 100 noch 0.001 erhalten können, so müssen die J' bis auf die Zehntel genau, also noch mit der zweiten Dezimale geführt werden. Für gewöhnliche Rechnungen genügt die erste Dezimale.

Führen wir nur den Näherungswert $a = 0.5$ ein, so erhalten wir an Stelle der rechten Seiten unseres Gleichungssystems:

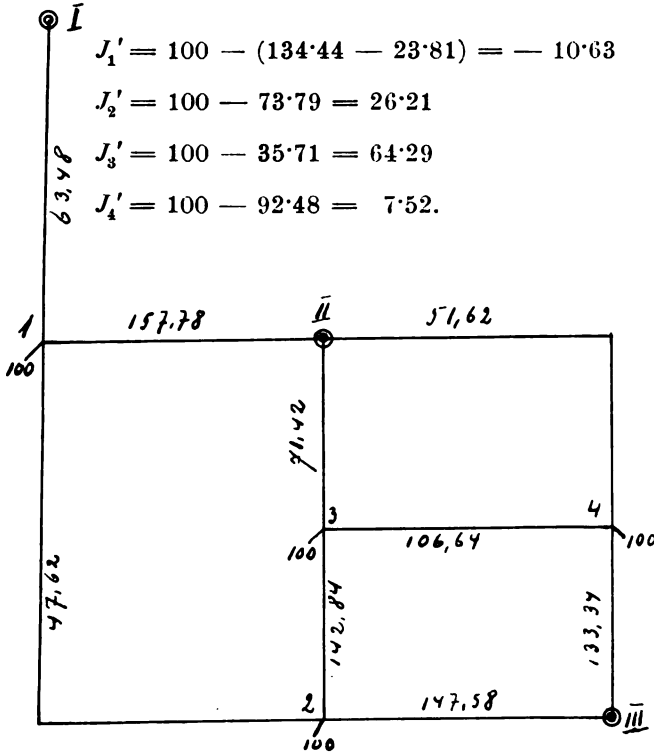


Fig. 91.

Den grössten absoluten Wert giebt J'_3 ; aus J'_3 bilden wir also den weiteren Näherungswert für ε_3 :

$$g_{33} = \frac{J'_3}{320.90} = + 0.200$$

und hätten nun nach Gleichung (134) die Koeffizienten der ε_3 mit dieser Zahl zu multiplizieren und die Produkte algebraisch von den Werten des J' zu subtrahieren. Bequemer wird jedoch die Rechnung, wenn wir jedesmal nur die erste Stelle des Näherungswertes für die Rechnung benützen, hier also 0.2, da wir dann alle Rechnungen im Kopf bewältigen können. In diesem speziellen Falle haben allerdings die anderen Dezimalen von selbst

den Wert Null; allgemein ist dies natürlich nicht der Fall. Führen wir die angedeuteten Rechenoperationen aus und vereinigen zugleich die Näherungswerte der ϵ sowie die rechten Seiten der Gleichungen in Tafeln, deren entsprechende Zeilen bzw. Säulen wir gleich numerieren, so erhalten wir:

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4		1	2	
1	0.500	0.500	0.500	0.500	J_1	-10.63	-10.63	= -10.63 + 0.2 · 0
2	—	—	0.200	—	J_2	26.21	54.78	= 26.21 + 0.2 · 142.84
					J_3	64.29	0.11	= 64.29 - 0.2 · 320.90
					J_4	7.52	28.85	= 7.52 + 0.2 · 106.64

Wir sehen also, dass in der That die absolute Summe der J -Werte abnimmt, trotzdem J_2 und J_4 grösser geworden sind als vorher. Nunmehr hat J_2 den grössten Wert, wir setzen also für ϵ_2 den Näherungswert $+\frac{54.78}{338.04} = 0.2$ und berechnen hiermit wiederum die weiteren J . Die Ausführung der Rechnung ergibt die in den folgenden Tabellen niedergelegten Zahlen — der Bequemlichkeit wegen sind die Kommas sowie die durch diese bedingten Nullen der J fortgelassen worden (s. Tabelle VII).

Nach der zehnten Reihe ist unter $10'$ eine Kontrollrechnung ausgeführt worden und ebenso nach der vierzehnten Reihe. Beide ergeben die Richtigkeit der Rechnung. Nach der vierzehnten Reihe konnte die Rechnung abgebrochen werden, da die letzten Zahlen, durch g_{rr} dividiert, kleiner als 0.001 werden. Wir erhalten also als Knotenpunkts-Spannungsverluste die Werte

$$\epsilon_1 = 0.50; \quad \epsilon_2 = 0.73; \quad \epsilon_3 = 0.85; \quad \epsilon_4 = 0.65.$$

Tabelle VII.

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	J_1	J_2	J_3	J_4
1	0.500	0.500	0.500	0.500	-1063	2621	6429	752
2	—	—	0.2	—	-1063	5478	11	2885
3	—	0.2	—	—	-111	1283	2868	2885
4	—	—	—	0.1	-111	1283	3934	-31
5	—	—	0.1	—	-111	145	725	1035
6	—	—	—	0.04	-111	145	1152	-131
7	—	—	0.04	—	-111	716	-132	296
8	—	0.02	—	—	-16	40	154	296
9	—	—	—	0.01	-16	40	261	4
10	—	—	0.01	—	-16	183	-60	111
10'	—	—	—	—	-16	183	-60	110
11	—	0.005	—	—	8	14	11	110
12	—	—	—	0.004	8	14	54	-7
13	—	—	0.002	—	8	43	-10	14
14	—	0.001	—	—	13	9	4	14
14'	—	—	—	—	13	8	3	15
	0.500	0.726	0.852	0.654				

Ist nun diese Art der Berechnung zwar sehr bequem, so wird sie doch bei einer grösseren Zahl von Gleichungen oft recht langwierig, besonders da bei den Kontrollrechnungen alle Multiplikationen bis auf die zweite Dezimale (d. h. bis auf 1 : 10000) genau ausgeführt werden müssen, also den Gebrauch des Rechenschiebers ausschliessen. Man kann nun die Zahl der Interpolationen des GAUSSschen Verfahrens bedeutend abkürzen, wenn man mit MEHMKE¹⁾ aus je zwei oder drei Gleichungen zwei bzw. drei Näherungswerte ε_k' , ε_l' , ε_m' zugleich bestimmt und alle diese Werte zur Reduktion der rechten Seiten benutzt. So würden wir z. B. bei gleichzeitiger Bestimmung zweier Näherungswerte ε_2 und ε_3 für unser Beispiel aus den reduzierten Gleichungen 2 und 3:

$$\begin{aligned} 338.04 \varepsilon_2' - 142.84 \varepsilon_3' &= 26.21 \\ - 142.84 \varepsilon_2' + 320.90 \varepsilon_3' &= 64.29 \end{aligned}$$

erhalten:

$$\varepsilon_2' = 0.2; \quad \varepsilon_3' = 0.3$$

und daraus

$$\begin{aligned} J_1'' &= -10.63 + 0.2 \cdot 47.62 = -1.11 \\ J_2'' &= 26.21 - 0.2 \cdot 338.04 + 0.3 \cdot 142.84 = 1.45 \\ J_3'' &= 64.29 + 0.2 \cdot 142.84 - 0.3 \cdot 320.90 = -3.45 \\ J_4'' &= 7.52 + 0.3 \cdot 106.64 = 39.50. \end{aligned}$$

Wie ersichtlich, ist die Konvergenz der Näherungswerte viel bedeutender, aber die Rechnung ist jetzt nicht mehr so bequem wie vorher. Dagegen wird durch einen anderen, ebenfalls von GAUSS²⁾ angegebenen Kunstgriff die Konvergenz des GAUSSschen Näherungsverfahrens gleichfalls beschleunigt und doch die Bequemlichkeit der Rechnung gewahrt und sogar vergrössert.

Dieser Kunstgriff besteht darin, dass man in dem Gleichungssystem zunächst eine neue Unbekannte ε_0' einführt,³⁾ indem man

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1' - \varepsilon_0'; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2' - \varepsilon_0' \dots \dots \dots (136)$$

setzt, und dann zur Vervollständigung dem so erhaltenen Gleichungssystem von n Gleichungen mit $n + 1$ Unbekannten noch eine neue Gleichung hinzufügt, deren Glieder so gebildet sind, dass sowohl ihre rechte Seite als die Koeffizienten von ε_0' , $\varepsilon_1' \dots \varepsilon_n'$ die algebraische Summe der entsprechenden Zahlen der zuletzt gebildeten Gleichungen zu Null ergänzen. Bei unseren Gleichungsformen, bei denen die Koeffizienten entsprechender vertikaler und horizontaler Reihen einander gleich sind, $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$, stimmen natürlich auch die Koeffizienten der Unbekannten ε_1' , $\varepsilon_2' \dots$ der neu zu bildenden Gleichung mit den entsprechenden Koeffizienten der neu entstandenen ε_0' -Glieder überein. Doch gilt die Methode auch allgemein für Gleichungen, bei denen

$$g_{\mu\nu} < g_{\nu\mu}$$

ist, so lange nur

$$g_{\nu\nu} > \sum g_{\mu\nu} > \sum g_{\nu\mu} \quad (\nu < \mu) \text{ ist.}$$

8. 114.

14.

Leitungsrechnungen in geschlossenen Leitungs-
netzen ... ETZ 1905, S. 1069.

81.
Näherungs-
verfahren
von
Mehmke.

82.
Gaussches
Verfahren.
Fortsetzung.

So entsteht z. B. aus der zweiten Gleichung unseres Beispiels auf S. 118, wenn wir die Gleichungen (136) einsetzen, die neue Gleichung

$$- 147.58 \epsilon_0' - 47.62 \epsilon_1' + 338.04 \epsilon_2' - 142.84 \epsilon_3' = 100$$

und ebenso ist für die neu zu bildende Gleichung der Koeffizient von ϵ_2' $- 147.58$, da $- 47.62 + 338.04 - 142.84 - 147.58 = 0$ ist.

Wiewohl also die Zahl der Unbekannten um eine vermehrt ist, wird doch bei gleicher Bequemlichkeit der Rechnung die Konvergenz energischer, und zwar deswegen, weil der Näherungswert der neuen Unbekannten ϵ_0' — wie auch an dem folgenden Beispiel leicht zu ersehen ist — infolge der Gleichung (136) zugleich allen übrigen ϵ zu gute kommt.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ergibt sich aus der neuen Gleichungsform für die Kontrolle der Rechnung. Denn da sowohl die Summe der Koeffizienten jeder Unbekannten als auch die Summe der rechten Gleichungsseiten Null ergibt, da ferner bei jeder durch die Näherungsrechnung bedingten Operation die Koeffizienten einer Unbekannten multipliziert mit demselben Faktor, also wieder eine Zahlenreihe, die zur Summe Null ergibt, abgezogen wird, so muss jede der neuen J -Reihen wiederum als Summe Null ergeben. Es kann also ohne weiteres bei jeder Zahlenreihe die Kontrolle durch einfache Addition der neuen Reihe oder auch nur der letzten Ziffern derselben erfolgen, ohne dass, wie früher, vorher genaue Multiplikationen auszuführen wären.

Wie aus dem folgenden Beispiel ersichtlich, bedeutet die Einführung der Unbekannten ϵ_0' nichts weiter, als die Einführung der vereinigten äquipotentiellen Speisepunkte als neuer Knotenpunkt, dessen Belastung der gesamte dem Netz zuzuführende und daher negativ zu nehmende Strom bildet. Die Grösse g_{00} , nämlich der Koeffizient von ϵ_0' in der neu zu bildenden Gleichung, ist die Summe der Leitfähigkeiten der von sämtlichen Speisepunkten ausgehenden Verteilungsleiter, während die Koeffizienten der ϵ_r' , nämlich g_{0r} , die Leitfähigkeit der Verbindung des r^{ten} Knotenpunktes mit den Speisepunkten bedeuten.

Beispiel. Wir bilden nach dem Vorhergehenden die neuen Gleichungen aus dem Gleichungssystem unseres Beispiels auf S. 118 und erhalten:

$$\begin{array}{rcl} 625.22 \epsilon_0' - 221.26 \epsilon_1' - 147.58 \epsilon_2' - 71.42 \epsilon_3' - 184.96 \epsilon_4' & = & - 400 \\ - 221.26 \epsilon_0' + 268.88 \epsilon_1' - 47.62 \epsilon_2' & = & 100 \\ - 147.58 \epsilon_0' - 47.62 \epsilon_1' + 338.04 \epsilon_2' - 142.84 \epsilon_3' & = & 100 \\ - 71.42 \epsilon_0' & - 142.84 \epsilon_2' + 320.90 \epsilon_3' - 106.64 \epsilon_4' & = 100 \\ - 184.96 \epsilon_0' & - 106.64 \epsilon_3' + 291.60 \epsilon_4' & = 100. \end{array}$$

Die Summe sowohl der rechten Seiten als der Koeffizienten der Unbekannten ist dem Bildungsgesetz nach gleich Null; die letzteren sind die oben definierten Leitfähigkeiten der Speisepunkte. Von der Einführung eines Näherungswertes können wir bei diesem Verfahren ganz absehen, da ja ϵ_0' die Rolle dieses Näherungswertes spielt, es sei denn, dass bereits genauere Näherungswerte infolge vorher ausgeführter Rechnungen bekannt sind. Solche Näherungswerte wird man stets zur Verkleinerung der rechten Seiten des gegebenen Gleichungssystems verwenden, da dies selbstverständlich die Rechnung wesentlich kürzt. Hier nehmen wir an, dass keine genauen Näherungs-

werte vorhanden sind, um dieses Verfahren mit dem früheren GAUSSschen vergleichen zu können.

Der grösste (absolute) Wert ist der für J_0 ; wir führen also als erste Annäherung den Wert

$$-\frac{400}{625.22} = -0.6$$

für ϵ_0 ein u. s. w., und erhalten endlich gemäss Gleichung (136) die einzelnen Unbekannten als Summe der Annäherungen algebraisch vermindert um den schliesslichen Wert von ϵ'_0 . Die Rechnung giebt die Werte der folgenden Tabelle VIII.

Tabelle VIII.

	ϵ'_0	ϵ'_1	ϵ'_2	ϵ'_3	ϵ'_4	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4
1	-0.6	—	—	—	—	-40000	10000	10000	10000	10000
2	—	—	—	0.2	—	-2487	-3276	1145	5715	-1097
3	—	—	0.1	—	—	-1059	-3276	4002	-703	1036
4	—	-0.1	—	—	—	417	-2800	622	725	1036
5	-0.03	—	—	—	—	-1796	-111	146	725	1036
6	—	-0.03	—	—	—	80	-775	-297	511	481
7	—	—	—	—	0.02	-584	32	-440	511	481
8	—	—	—	0.02	—	-214	32	-440	724	-102
9	—	—	-0.005	—	—	-71	32	-154	82	111
10	—	—	—	—	0.004	-145	8	15	11	111
11	—	—	—	0.002	—	-71	8	15	53	-5
	-0.630	-0.130	0.095	0.222	0.024	-57	8	44	-11	16
	$-\epsilon'_0 = +0.630$	0.630	0.630	0.630	0.630					
	0.500	0.725	0.852	0.654						

Nach der elften Reihe konnte die Rechnung abgebrochen werden, da die Reste, dividiert durch ihre Diagonalkoeffizienten, nur noch 0.001 oder weniger betragen. Wir erhalten also die gleichen Werte für die Unbekannten wie früher, und zwar bereits nach zehn Annäherungen (gegen vierzehn des früheren Verfahrens), während zugleich die besonderen Kontrollrechnungen fortfallen. Mehr noch zeigen sich die Vorteile der letzten Methode bei einer grösseren Zahl von Unbekannten, da sich dann die Anzahl der auszuführenden Näherungsrechnungen, besonders bei geringer Konvergenz der Näherungswerte, viel mehr vermindert.

Hatte das GAUSSsche Verfahren der Auflösung des Gleichungssystems (XXVII) durch allmähliche Annäherung an die wahren Werte der Unbekannten die Bedingung zur Voraussetzung, dass in der Determinante des Systems

83.
Verfahren
von
Verhoeckx.

$$g_{\nu\nu} > \sum g_{\mu\nu} \quad (\mu \geq \nu)$$

ist, so stützt sich die von P. M. VERHOECKX¹⁾ angegebene Methode der schrittweisen Einführung der Knotenpunkte (bezw. der Unbekannten) auf die

1) S. Fussnote 2, S. 115.

also durch die Multiplikation von D und R n^2 Gleichungen zwischen den bekannten g und den unbekannten q , die die letzteren zu berechnen gestatten. Mit VERHOECKX stellen wir diese n^2 -Gleichungen symbolisch in der folgenden Weise dar:

$$DR = \begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1n} \\ -g_{21} & g_{22} & \cdots & -g_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & g_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nn} \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix} \quad (139)$$

und verstehen diese symbolische Bezeichnung so, dass jedes der durch die Multiplikation der Determinanten entstehende Polynom dem entsprechenden Gliede der auf der rechten Seite stehenden Determinante gleich ist.

84. Machen wir nun den n^{ten} Knotenpunkt zu einem Speisepunkt, so wird Fortsetzung. $\varepsilon_n = 0$ und die n^{te} Reihe wie die n^{te} Säule der Determinanten D und R fallen der Lösung fort. Wir erhalten also:

für
n Knoten-
punkte aus
der für $n-1$
Knoten-
punkte. $D' R' \equiv$

$$\begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1,n-1} \\ -g_{12} & g_{22} & \cdots & -g_{2,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -g_{n-1,1} & -g_{n-1,2} & \cdots & g_{n-1,n-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1,n-1} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{n-1,1} & q_{n-1,2} & \cdots & q_{n-1,n-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix} \quad (140)$$

Das Verfahren besteht nun darin, zu zeigen, wie aus der „Lösung für $n-1$ Knotenpunkte“, d. h. wenn die Werte der $q_{\mu\nu}$ für $n-1$ Knotenpunkte bekannt und etwa gleich $a_{\mu\nu}$ sind, die Lösung für n Knotenpunkte gefunden wird, wenn also der n^{te} Kreuzungspunkt wieder seines Charakters als Speisepunkt entkleidet und zum Knotenpunkt gemacht wird.

Zu diesem Zwecke erweitern wir die Determinante D' durch die bekannten Leitfähigkeiten des n^{ten} Knotenpunktes, die Determinante R' mit ihren bekannten Werten $a_{\mu\nu}$ aber durch eine Reihe und eine Säule von Nullen zu Determinanten n^{ten} Grades. Wir erhalten so ein Gleichungssystem von n^2 Identitäten:

$$\begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1,n-1} & -g_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -g_{n-1,1} & -g_{n-1,2} & \cdots & g_{n-1,n-1} & -g_{n-1,n} \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & -g_{n,n-1} & g_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1,n-1} & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ -b_{n1} & -b_{n2} & \cdots & -b_{n,n-1} & 0 \end{vmatrix} \quad (141)$$

$$\text{wo} \quad \left. \begin{aligned} b_{n1} &\equiv g_{n1} a_{11} + g_{n2} a_{12} + \cdots + g_{n,n-1} a_{1,n-1} \\ b_{n2} &\equiv g_{n1} a_{21} + g_{n2} a_{22} + \cdots + g_{n,n-1} a_{2,n-1} \\ &\vdots \\ b_{n,n-1} &\equiv g_{n1} a_{n-1,1} + g_{n2} a_{n-1,2} + \cdots + g_{n,n-1} a_{n-1,n-1} \end{aligned} \right\} \quad (142)$$

oder symbolisch

$$\begin{vmatrix} g_{n1} & a_{11} & \cdots & a_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{nr} & a_{r1} & \cdots & a_{r,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n,n-1} & a_{n-1,1} & \cdots & a_{n-1,n-1} \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} b_{n1} \\ \vdots \\ b_{nr} \\ \vdots \\ b_{n,n-1} \end{vmatrix} \quad (142a)$$

aus den bekannten g_{nr} und den $a_{\mu r}$ der Lösung für $n-1$ Knotenpunkte berechnet wird.

Subtrahieren wir das Gleichungssystem (141) von (139), so erhalten wir:

$$D \cdot \begin{vmatrix} q_{11} - a_{11}, & q_{12} - a_{12} & \cdots & q_{1,n-1} - a_{1,n-1}, & q_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ q_{n-1,1} - a_{n-1,1}, & q_{n-1,2} - a_{n-1,2} & \cdots & q_{n-1,n-1} - a_{n-1,n-1}, & q_{n-1,n} \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{n,n-1} & q_{nn} \end{vmatrix} \\ \equiv \begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{n,n-1} & 1 \end{vmatrix} \quad (143)$$

also n^2 Gleichungen zwischen den n^2 Unbekannten $q_{\mu r}$ und den bekannten Grössen g , a und b , aus denen die ersteren sich in folgender Weise ergeben:

Wir multiplizieren die Gleichungen des Systems (142) der Reihe nach mit g_{11} , $-g_{12}$, \cdots $-g_{1,n-1}$ und addieren, so folgt:

$$\begin{aligned} g_{11} b_{n1} - g_{12} b_{n2} - \cdots - g_{1,n-1} b_{n,n-1} \\ = g_{n1} (g_{11} a_{11} - g_{12} a_{21} - \cdots - g_{1,n-1} a_{n-1,1}) \\ + g_{n2} (g_{11} a_{12} - g_{12} a_{22} - \cdots - g_{1,n-1} a_{n-1,2}) \\ + \cdots \\ + g_{n,n-1} (g_{11} a_{1,n-1} - g_{12} a_{2,n-1} - \cdots - g_{1,n-1} a_{n-1,n-1}) \\ = g_{n1}, \end{aligned}$$

denn nach (140) oder (141) ist der Ausdruck in der ersten Klammer $= 1$, während die übrigen Klammerpolynome verschwinden. Weitere $n-1$ Gleichungen erhalten wir durch Multiplikation von (142) mit der zweiten bis n^{ten} Reihe der Determinante D und nachfolgende Addition, und zwar können wir diese n Gleichungen symbolisch zusammenfassen in den folgenden Ausdruck:

$$D \cdot \begin{vmatrix} b_{n1} \\ b_{n2} \\ \dots \\ b_{n,n-1} \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ c_n \end{vmatrix} \quad (144)$$

wenn wir setzen:

$$\dots g_{n1} b_{n1} - g_{n2} b_{n2} - \dots - g_{n,n-1} b_{n,n-1} + g_{nn} = c_n \quad (145)$$

Dividieren wir schliesslich die Gleichungen (143) links und rechts durch $b_{n1} \cdot b_{n2} \dots b_{n,n-1}$, ferner das System (144) durch c_n , so erhalten wir:

$$D \cdot \begin{vmatrix} \frac{q_{11} - a_{11}}{b_{n1}} & \frac{q_{12} - a_{12}}{b_{n2}} & \dots & \frac{q_{1,n-1} - a_{1,n-1}}{b_{n,n-1}} & q_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{q_{n-1,1} - a_{n-1,1}}{b_{n1}} & \frac{q_{n-1,2} - a_{n-1,2}}{b_{n2}} & \dots & \frac{q_{n-1,n-1} - a_{n-1,n-1}}{b_{n,n-1}} & q_{n-1,n} \\ \frac{q_{n1}}{b_{n1}} & \frac{q_{n2}}{b_{n2}} & \dots & \frac{q_{n,n-1}}{b_{n,n-1}} & q_{nn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (143a)$$

und

$$D \cdot \begin{vmatrix} b_{n1} \\ c_n \\ \dots \\ b_{n,n-1} \\ c_n \\ 1 \\ c_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (144a)$$

Hieraus ist aber unmittelbar durch Vergleich zu ersehen, dass

$$\begin{aligned} \frac{q_{11} - a_{11}}{b_{n1}} &= \frac{q_{12} - a_{12}}{b_{n2}} = \dots = \frac{q_{1,n-1} - a_{1,n-1}}{b_{n,n-1}} = q_{1n} = \frac{b_{n1}}{c_n} \\ \frac{q_{21} - a_{21}}{b_{n1}} &= \frac{q_{22} - a_{22}}{b_{n2}} = \dots = \frac{q_{2,n-1} - a_{2,n-1}}{b_{n,n-1}} = q_{2n} = \frac{b_{n2}}{c_n} \\ &\dots \\ \frac{q_{n-1,1} - a_{n-1,1}}{b_{n1}} &= \frac{q_{n-1,2} - a_{n-1,2}}{b_{n2}} = \dots = \frac{q_{n-1,n-1} - a_{n-1,n-1}}{b_{n,n-1}} = q_{n-1,n} = \frac{b_{n,n-1}}{c_n} \\ \frac{q_{n1}}{b_{n1}} &= \frac{q_{n2}}{b_{n2}} = \dots = \frac{q_{n,n-1}}{b_{n,n-1}} = q_{nn} = \frac{1}{c_n} \end{aligned}$$

Die schliesslichen Werte der Spannungsverluste ε werden durch die Gleichungen (137) ermittelt, die zu gleicher Zeit eine Kontrolle für die Richtigkeit der Rechnung auf jeder Stufe ermöglichen, da ja für

$$J_1 = J_2 = \dots = J_n = 1$$

(oder auch bequemer für $J = 100$ oder 1000 je nach der angestrebten Genauigkeit)

$$\varepsilon_v = \varrho_{v1} + \varrho_{v2} + \dots + \varrho_{vn} \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

berechnet und in die Gleichungen (XXVII) eingesetzt, diese erfüllen müssen.

88.
Netz-
kontrolle.

Bei in Betrieb befindlichen Netzen, deren Belastung naturgemäss in doppelter Weise fortwährenden Änderungen unterworfen ist, nämlich dadurch, dass einerseits zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten ein verschieden grosser Teil der angeschlossenen Lampen zugleich brennt, andererseits die Anzahl der angeschlossenen Lampen selbst sich dauernd vermehrt, ist eine ständige Kontrolle der maximalen Spannungsverluste und der Leiterbelastungen erforderlich, um sowohl Überlastungen des Querschnitts als auch eine unzulässige Grösse der Spannungsschwankungen [5] zu vermeiden. Es sind also dauernd Neuberechnungen der Spannungsverluste bei verschiedenen Belastungen, die möglichst durch unmittelbare Strommessung an verschiedenen Stellen des Netzes zu ermitteln sind, vorzunehmen, eine Arbeit, die sich vermittle der Gleichungen (137) sehr einfach gestaltet, wenn einmal die Grössen g für das Netz festgelegt sind.

Beispiel.

Als Beispiel berechnen wir das auf S. 119 skizzierte Netz nach dieser Methode, und zwar wie bisher zunächst für die Einheitsbelastung von 100 Amp. in jedem Knotenpunkt. Die Leitfähigkeiten des Netzes sind:

$$\begin{array}{llll} g_{11} = 268.88 & g_{12} = 47.62 & g_{13} = 0 & g_{14} = 0 \\ & g_{22} = 338.04 & g_{23} = 142.84 & g_{24} = 0 \\ & & g_{33} = 320.90 & g_{34} = 106.64 \\ & & & g_{44} = 291.60 \end{array}$$

Für den Knotenpunkt 1 wird

$$1. \quad \varrho_{11} = \frac{1}{g_{11}} = 0.00372.$$

Ferner erhalten wir nach stufenweiser Hinzufügung der Knotenpunkte 2, 3 und 4:

$$2. \quad b_{21} = 0.177_2; \quad c_2 = 329.6$$

$$\varrho_{11} = 0.00382; \quad \varrho_{12} = 0.000538; \quad \varrho_{22} = 0.00304.$$

$$3. \quad b_{31} = 0.0767; \quad b_{32} = 0.434; \quad c_3 = 258.9$$

$$\varrho_{11} = 0.00384; \quad \varrho_{12} = 0.000666; \quad \varrho_{13} = 0.000296$$

$$\varrho_{22} = 0.00376; \quad \varrho_{23} = 0.00167_4; \quad \varrho_{33} = 0.00386.$$

$$4. \quad b_{41} = 0.0316; \quad b_{42} = 0.178_4; \quad b_{43} = 0.411_5; \quad c_4 = 247.6_5$$

$$\varrho_{11} = 0.00384; \quad \varrho_{12} = 0.000689; \quad \varrho_{13} = 0.000348; \quad \varrho_{14} = 0.000128.$$

$$\varrho_{22} = 0.00389; \quad \varrho_{23} = 0.00197; \quad \varrho_{24} = 0.000721.$$

$$\varrho_{33} = 0.00454; \quad \varrho_{34} = 0.00166_7.$$

$$\varrho_{44} = 0.00404.$$

Die Spannungsverluste in den Knotenpunkten sind also für

$$J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = 100 \text{ Amp.}:$$

$\varepsilon_1 = 0.384$	$\varepsilon_2 = 0.069$	$\varepsilon_3 = 0.035$	$\varepsilon_4 = 0.013$
0.069	0.383	0.197	0.072
0.035	0.197	0.454	0.166
0.013	0.072	0.166	0.404
<u>0.501</u>	<u>0.727</u>	<u>0.852</u>	<u>0.655</u>

also die gleichen Werte wie früher. Für jede andere Belastung der Knotenpunkte würde sich ergeben:

$$\begin{aligned} 100 \varepsilon_1 &= 0.384 J_1 + 0.0689 J_2 + 0.0348 J_3 + 0.0128 J_4 \\ 100 \varepsilon_2 &= 0.0689 J_1 + 0.389 J_2 + 0.197 J_3 + 0.0721 J_4 \\ 100 \varepsilon_3 &= 0.0348 J_1 + 0.197 J_2 + 0.454 J_3 + 0.166 J_4 \\ 100 \varepsilon_4 &= 0.0128 J_1 + 0.0721 J_2 + 0.166 J_3 + 0.404 J_4. \end{aligned}$$

Als Kontrolle erhalten wir vermittle der Gleichungen (XXVII):

$$\begin{aligned} g_{11} \varepsilon_1 &= 134.6 & -g_{12} \varepsilon_1 &= -23.9 & -g_{23} \varepsilon_2 &= -103.7 & -g_{34} \varepsilon_3 &= -91.1 \\ -g_{12} \varepsilon_2 &= -34.6 & g_{22} \varepsilon_2 &= 245.5 & g_{33} \varepsilon_3 &= 274.0 & g_{44} \varepsilon_4 &= 191.0 \\ J_1 &= 100.0 & -g_{23} \varepsilon_3 &= -121.8 & -g_{34} \varepsilon_4 &= -69.9 & J_4 &= 99.9 \\ & & J_2 &= 99.8 & J_3 &= 100.2 & & \end{aligned}$$

also genügende Übereinstimmung, soweit die Genauigkeit des Rechenschiebers erwarten liess.

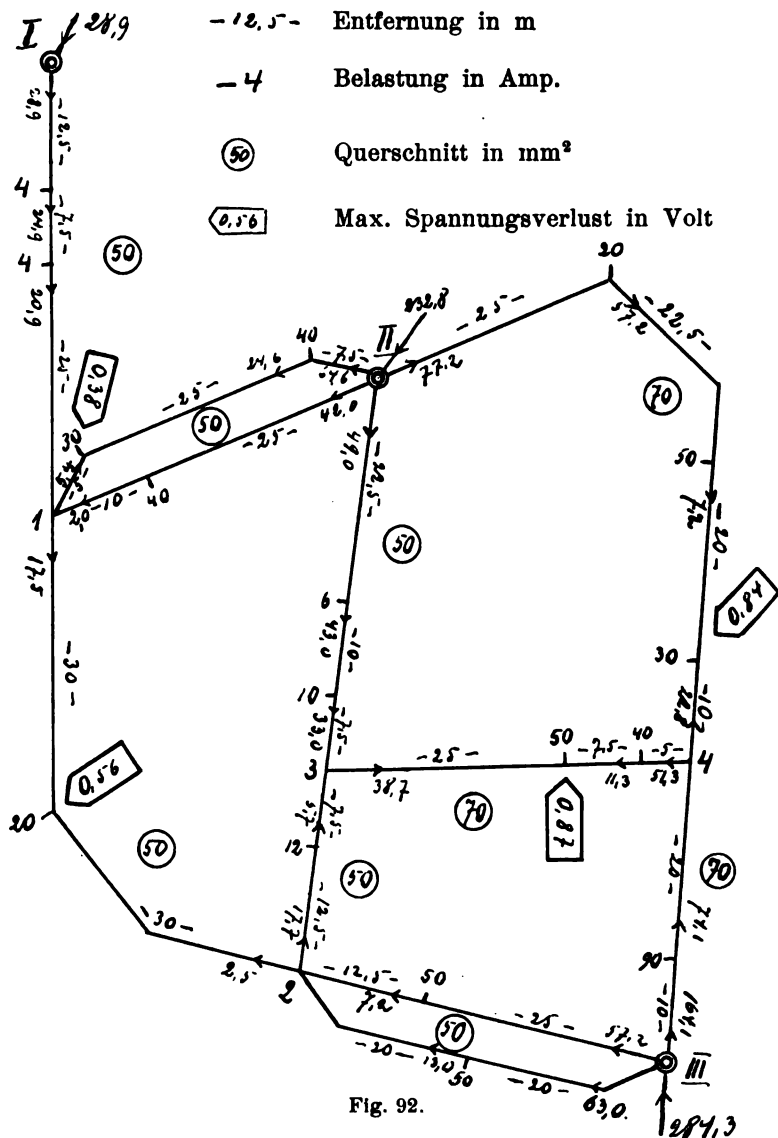
Hiermit ist die Berechnung der allgemeinen Stromverteilung des Netzes für eine Belastung der Knotenpunkte mit der Stromeinheit von 100 Amp. beendet. Wir wollen nun noch die der wirklichen Netzbelastung entsprechende Spannungsverteilung ermitteln und an diesem Beispiel das Verfahren der Verlegung der Abzweigströme auf die Knotenpunkte und die Überlagerung der beiden fingierten Stromverteilungen nach Abschnitt [70] darlegen.

In Fig. 92 möge diese thatsächliche Belastung dargestellt sein. Den Querschnitten und Längen der Leitungen entsprechen die den vorhergehenden Rechnungen und der Figur 91 zu Grunde gelegten Leitfähigkeiten. Wir ermitteln also die Belastungen der Knotenpunkte, indem wir sämtliche Kreuzungspunkte zu Speisepunkten machen und Gleichung (XXI) [63] bzw. (115 a) [65] auf alle Abzweigungen anwenden. Wir erhalten so die Stromverteilung Fig. 93 und die Knotenpunktsbelastungen

$$J_1 = 75.47; \quad J_2 = 72.83; \quad J_3 = 41.00; \quad J_4 = 161.23.$$

Daher ergeben sich die wahren Spannungsverluste in den Knotenpunkten zu:

0.384 = 29.0	75.47 · 0.0689 = 5.2	75.47 · 0.0348 = 2.6	75.47 · 0.0128 = 1.0
0.0689 = 5.0	72.83 · 0.389 = 28.4	72.83 · 0.197 = 28.7	72.83 · 0.0721 = 5.2
0.0348 = 1.4	41.00 · 0.197 = 8.1	41.00 · 0.454 = 18.6	41.00 · 0.166 = 6.8
0.0128 = 2.1	161.23 · 0.0721 = 11.6	161.23 · 0.166 = 26.8	161.23 · 0.404 = 65.1
<u>37.5</u>	<u>53.3</u>	<u>62.4</u>	<u>78.1</u>
$\varepsilon_1 = 0.375$	$\varepsilon_2 = 0.533$	$\varepsilon_3 = 0.624$	$\varepsilon_4 = 0.781$



g. 94). Als Kontrolle für die Rechnung sind die in den Knotenpunkten ammenlaufenden Ströme addiert; die geringen, aus der Ungenauigkeit der Multiplikation entstandenen Differenzen sind durch entsprechende Änderung der Stromwerte zu entfernen. Durch Überlagerung der Stromverteilungen (Fig. 93 u. 94) erhalten wir schliesslich die wahre Stromverteilung und die daraus sich ergebenden maximalen Spannungsverluste, wie sie in der Fig. 92 dargestellt sind.

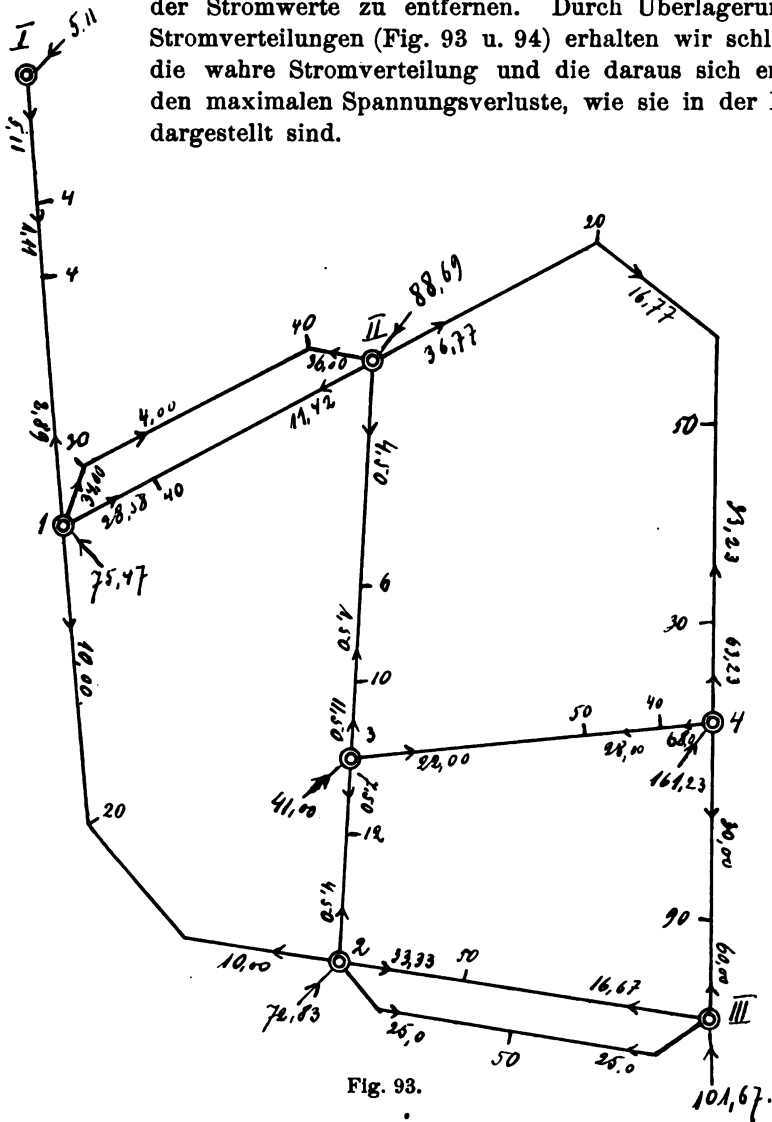


Fig. 93.

Wir wollen nun die beiden Verfahren, die die Lösung des Gleichungssystems, auf das uns die Spannungsmethode führte, und damit die systematische Berechnung von Leitungsnetzen in ihrer ganzen Ausdehnung, also die Zerlegung derselben in einzelne Teile, und daher mit voller Genauigkeit gestatten, miteinander vergleichen, um ihre Vor- und Nachteile zu erkennen. Offenbar sind die Rechenoperationen der GAUSSschen Methode einfacher und, besonders bei ausgedehnten Netzen, auch kürzer als die des VERHOECKschen Verfahrens, besonders wenn oft zu wiederholende Kontrollrechnungen bereits genaue Näherungswerte für die unbekannten Spannungsverluste ergeben haben. Ferner ist auch die Kontrolle der Richtigkeit der

87.
Vergleich
zwischen
dem GAUSS-
schen und
VERHOECK-
schen Ver-
fahren.

Rechnung im ersten Falle wesentlich einfacher und kürzer, da ja bei der VERHOECKXschen Methode zu diesem Zwecke stets die Summen mehrerer Produkte mit erheblicher Genauigkeit aufzustellen sind und, falls sich ein Fehler herausstellt, dieser durch Wiederholung der Rechnung, im ungünstigsten Falle bis zur letzten Kontrolle, ermittelt werden muss. Stellt sich

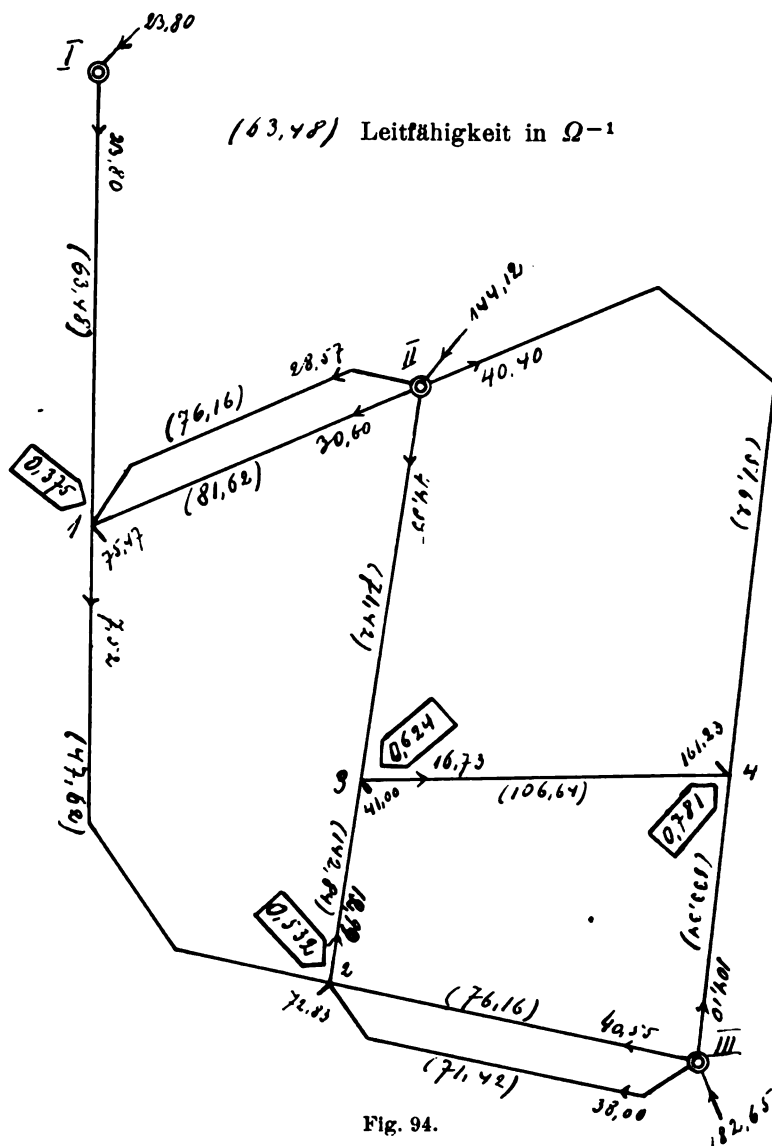


Fig. 94.

weiterhin im Laufe der Rechnung heraus, dass ein Querschnitt geändert werden muss, so müssen bei dem letzten Verfahren sämtliche Rechnungen von dem Punkte an, wo der geänderte Querschnitt zuerst auftrat, ganz von neuem ausgeführt werden, da sich mit einer Leitfähigkeit auch alle anderen von dieser abhängigen Größen ändern. Bei der GAUSSschen Methode werden dagegen in diesem Falle nur wenige Näherungen zu berechnen sein, da die zuletzt erhaltenen genauen Werte der ε als erste Näherungswerte verwendet

werden können und im allgemeinen durch Änderung des Querschnittes eines oder einiger Kabel nur die Spannungsverluste der nächstliegenden Knotenpunkte sich wesentlich ändern, während die anderen nur wenig oder gar nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Dagegen ist das Verwendungsgebiet der VERHOECKXschen Methode theoretisch ausgedehnter als das der GAUSSschen; denn die letztere stützt sich auf die Bedingung, dass die Diagonalglieder der Determinante gleich oder grösser sein sollen als die Summe der übrigen (absolut genommenen) Reihenglieder. In Wechselstromnetzen aber setzen sich die Widerstände bzw. die Leitfähigkeiten der Leitungen, wenn Kapazität und Induktivität in Frage kommen, aus zwei Gliedern zusammen, die wir nach dem Früheren [47] in folgender Form schreiben wollen:

$$w = w' + jw''; \quad g = g' + jg''.$$

Dann gehen natürlich ε und J über in

$$\varepsilon' + j\varepsilon'' \quad \text{und} \quad J' + jJ'',$$

und das Gleichungssystem (XXVII) [76] wird demnach lauten:

$$\begin{aligned} &-(g_{v1}' + jg_{v1}'')(\varepsilon_1' + j\varepsilon_1'') - \dots + (g_{vv}' + jg_{vv}'')(\varepsilon_v' + j\varepsilon_v'') - \dots \\ &-(g_{vn}' + jg_{vn}'')(\varepsilon_n' + j\varepsilon_n'') = J_v' + jJ_v'' \quad (v = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

oder nach Gleichsetzung des reellen und imaginären Teils:

$$\begin{aligned} &-g_{v1}'\varepsilon_1' + g_{v1}''\varepsilon_1'' - \dots + g_{vv}'\varepsilon_v' - g_{vv}''\varepsilon_v'' - \dots \\ &-g_{vn}'\varepsilon_n' + g_{vn}''\varepsilon_n'' = J_v' \\ &g_{v1}''\varepsilon_1' + g_{v1}'\varepsilon_1'' - \dots - g_{vv}''\varepsilon_v' + g_{vv}'\varepsilon_v'' + \dots \\ &+ g_{vn}''\varepsilon_n' + g_{vn}'\varepsilon_n'' = -J_v''. \end{aligned}$$

Es geht also über in ein System von $2n$ Gleichungen mit $2n$ Unbekannten, dessen Determinante zur Diagonalreihe nach wie vor symmetrisch ist; dagegen ist die Voraussetzung für die Anwendung des GAUSSschen Näherungsverfahrens nicht mehr erfüllt, das letztere versagt also, während die Methode von VERHOECKX auch hier anwendbar bleibt. In der Praxis kommt aber dieser Fall kaum vor, da bei den verhältnismässig geringen Längen der Verteilungskabel geschlossener Netze Induktivität und Kapazität so gering sind, dass die Reaktanz gegen den OHMSchen Widerstand nicht in Frage kommt. Anders ist es allerdings, wie wir gesehen haben [60], bei langen Leitungen, bei denen unter Umständen sehr wohl diese Grössen zu berücksichtigen sind.

Ein anderer wesentlicher Vorteil des VERHOECKXschen Verfahrens ist der, dass in den ϱ die Spannungsverluste des in nur einem Knotenpunkte mit der Stromeinheit belasteten Netzes erhalten werden und man daher mittels Gleichung (137) die Spannungsverluste bei allen anderen Belastungen ermitteln kann. Eine derartige Rechnung mit veränderlichen Stromabnahmen muss z. B. bei in Betrieb befindlichen Netzen [86] häufig vorgenommen werden, um den Einfluss von Belastungsänderungen des Netzes — etwa

durch Anschluss neuer Abnehmer oder dgl. — kennen zu lernen. Wollte man diese Grössen ϱ nach der GAUSSschen Methode ermitteln, so müsste die gesamte Rechnung so oft durchgeführt werden als Knotenpunkte vorhanden sind, indem stets nur ein Knotenpunkt mit der Einheit belastet würde, woraus ohne weiteres die Überlegenheit des VERHOECKXschen Verfahrens für diesen Fall erhellt.

Man kann also sagen: Für neu zu berechnende, zu projektierende Netze ist die Lösung der Gleichungen nach dem GAUSSschen Verfahren, für im Betrieb zu kontrollierende Netze ist die Lösung nach dem VERHOECKXschen Verfahren vorteilhafter.

Netzberechnung durch schrittweise Vereinfachung des Netzes.

88. Wir wenden uns nunmehr zu einem anderen Verfahren, die Stromverteilung in Netzen zu bestimmen, das nicht sowohl auf der Aufstellung und Auflösung eines Systems von Gleichungen als vielmehr auf einer schrittweisen Zurückführung der komplizierten Leiterverbindungen des Netzes auf

Methode der
widerstands-
treuen Netz-
umbildung.
(Frick-
Kenelly.)

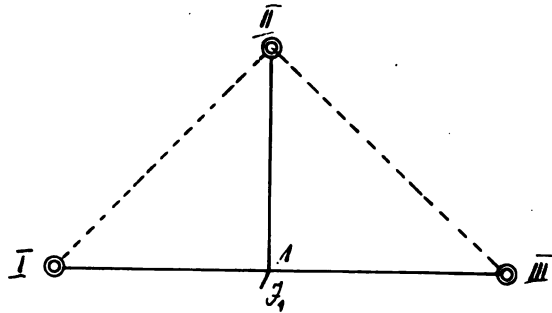


Fig. 95.

einfache Gebilde beruht, und daher, wenn auch in anderer Richtung, gleiche Ziele verfolgt, wie das VERHOECKXsche Verfahren. Es ist die Methode der „widerstandstreuen Netzbildung“,¹⁾ die zuerst von OTTO FRICK²⁾ veröffentlicht und später von KENELLY³⁾ und HERZOG-FELDMANN¹⁾ weiter ausgebildet worden ist.

89. Gehen wir wieder von dem einfachsten Falle aus, einem Netz, das nur aus einem Knotenpunkt besteht, der von drei Speisepunkten aus mit Strom versehen wird (Fig. 95), so können wir die drei Speisepunkte, da sie der

Zweieck-
Umbildung.
(Frick.)

1) Diese Bezeichnung für das zu beschreibende Verfahren wurde von HERZOG-FELDMANN in der ETZ 1900, S. 167, zugleich mit der Benennung „Netztransfiguration“ eingeführt. Mit Recht beklagen diese Autoren, dass der fremdsprachige Ausdruck, den sie allerdings gleichwertig mit der deutschen Bezeichnung verwenden, von den deutschen Schriftstellern vorzugsweise benutzt wird, während die letztere wenig Anklang gefunden hat.

2) Z. f. E. 1894, S. 265. Siehe auch Fussnote 1, S. 102.

3) A. E. KENELLY: On the determination of current strength in threepointed star resistance systems. El. World, Bd. XXXIV, 1899, S. 268, und: The equivalence of triangles and threepointed stars in conducting networks. Ebenda S. 413. Siehe auch ferner: MONATH: Die Methode der Umformungen . . . Z. f. E. 1902, S. 537. GALLUSSER: Eine einfache Methode . . . ETZ 1903, S. 310.

Voraussetzung gemäss gleiches Potential besitzen, zusammenlegen und erhalten so zwei Zweiecke $I1II$ und $II1III$ (Fig. 96). Da jedes Zweieck aus zwei parallel geschalteten Strecken besteht, die frei von Abzweigungen sind, so können wir sie zu einer äquivalenten Strecke zusammenfassen und er-



Fig. 96.

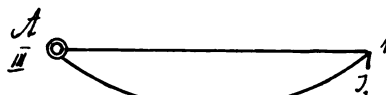


Fig. 97.

halten so zunächst aus $I1$ und $II1$ die Strecke $A1$ (Fig. 97), deren äquivalente Leitfähigkeit

$$g_{A1} = g_{I1} + g_{II1},$$

und schliesslich aus $A1$ und $III1$ die äquivalente Strecke $B1$, deren Leitfähigkeit

$$g_1 = g_{I1} + g_{II1} + g_{III1},$$

und deren Widerstand also

$$w_1 = \frac{1}{g_1}$$

ist. Dadurch ist diese Leiterverbindung auf den einfachen Fall einer am Ende belasteten Strecke zurückgeführt [3], und der Spannungsverlust in 1 ergibt sich gemäss Gleichung (2) zu

$$\varepsilon_1 = J_1 w_1.$$

Da ferner nach dem zweiten KIRCHHOFFSchen Satze bei parallel geschalteten Leitern die Ströme in diesen sich verhalten wie deren Leitfähigkeiten, so wird

$$J_{I1} : J_{II1} : J_{III1} : J_1 = g_{I1} : g_{II1} : g_{III1} : g_1$$

oder

$$\left. \begin{aligned} J_{I1} &= \frac{g_{I1}}{g_1} \cdot J_1 \\ J_{II1} &= \frac{g_{II1}}{g_1} \cdot J_1 \\ J_{III1} &= \frac{g_{III1}}{g_1} \cdot J_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (147)$$

womit die Stromverteilung bestimmt ist.

Liegen Netze mit mehreren Knotenpunkten vor, so gestaltet sich das FRICKSche Verfahren folgendermassen (Fig. 98):

Nachdem alle Belastungen auf die Knotenpunkte übertragen und etwaige parallele Leitungen durch einen äquivalenten Strang ersetzt sind, verbinden wir die Speisepunkte durch widerstandslose Leitungen, die jedoch andere Leiter nicht schneiden dürfen. Es entstehen dadurch in dem vorliegenden

90.
Zweieck-
Umbildung
bei mehreren
Knoten-
punkten.

Fälle zunächst zwei Zweiecke, $I1II$ und $I5II$, deren Seiten wir durch äquivalente Strecken ersetzen, und zwar wird (Fig. 99):

$$g_{A1} = g_{I1} + g_{II1}; \quad w_{A1} = \frac{1}{g_{A1}}$$

$$g_{A5} = g_{I5} + g_{II5}; \quad w_{A5} = \frac{1}{g_{A5}}.$$

Dadurch verlieren aber die Punkte 1 und 5 den Charakter von Knotenpunkten und wir können daher ihre Belastungen äquipotentiell auf A und 2

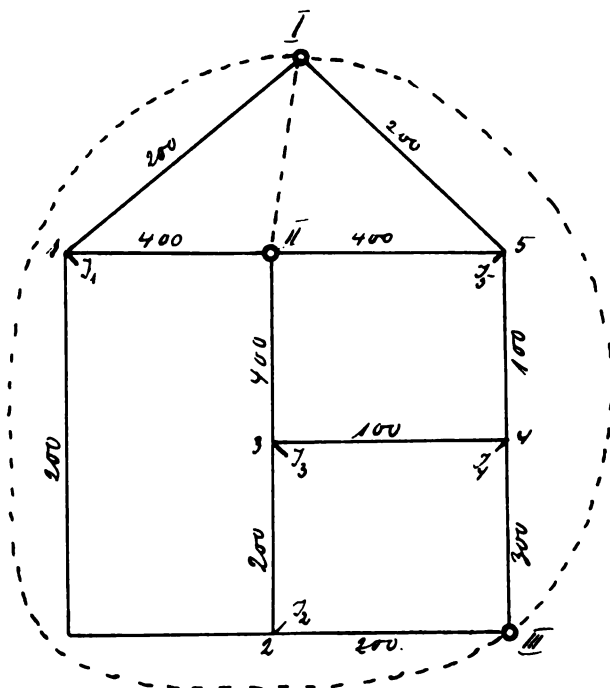


Fig. 98.

bezw. 4 übertragen. Die neuen Belastungen dieser Punkte berechnen sich nach Gleichung (XXV) [69] zu

$$J_A = \frac{w_{1A}}{w_{A2}} J_1 + \frac{w_{5A}}{w_{A4}} J_5 = (J_1)_A + (J_5)_A$$

$$J_2' = J_2 + \frac{w_{A1}}{w_{A2}} J_1 = J_2 + (J_1)_2$$

$$J_4' = J_4 + \frac{w_{A5}}{w_{A4}} J_5 = J_4 + (J_5)_4.$$

Als Kontrolle ist zu beachten, dass die Summe der neu berechneten Ströme $J_A + J_2' + J_4'$ gleich der Summe der bisher durch Verlegung veränderten Ströme, also gleich $J_1 + J_2 + J_4 + J_5$ sein muss.

Nunmehr bilden die Verbindungen $A2III$ und $A4III$ Zweiecke, deren Seiten durch äquivalente Strecken zu ersetzen sind. Es wird (Fig. 100)

$$g_{B2} = g_{A2} + g_{III2}; \quad w_{B2} = \frac{1}{g_{B2}}$$

$$g_{B4} = g_{A4} + g_{III4}; \quad w_{B4} = \frac{1}{g_{B4}}.$$

Jetzt haben die Punkte 2 und 4 ihren Knotenpunkt-Charakter verloren und wir erhalten daher durch Äquipotentielle Übertragung ihrer Lasten:

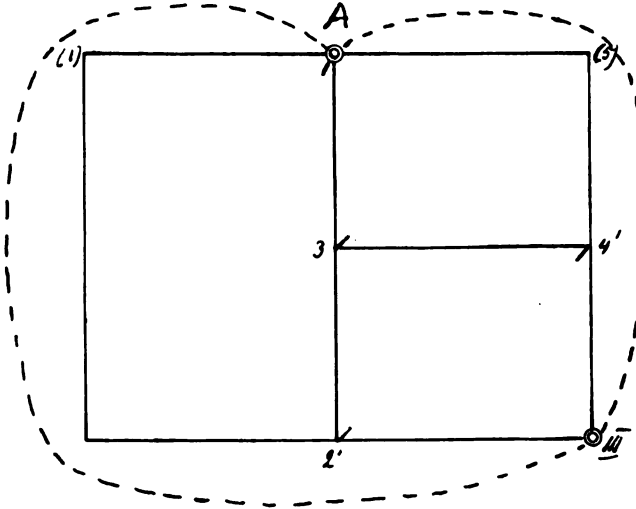


Fig. 99.

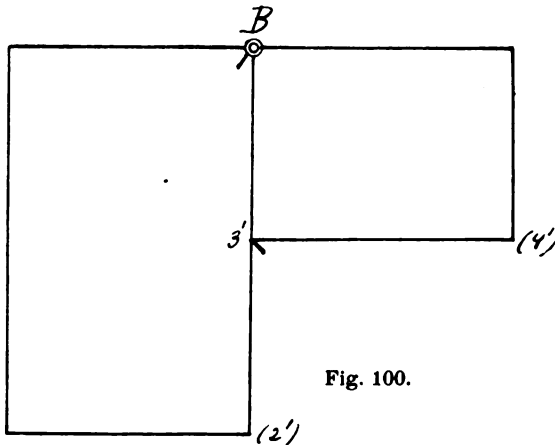


Fig. 100.

$$J_B = J_A + \frac{w_{23}}{w_{B23}} J_2' + \frac{w_{34}}{w_{B43}} J_4' = J_{.1} + (J_2')_B + (J_4')_B$$

$$J_3' = J_3 + \frac{w_{32}}{w_{B23}} J_2' + \frac{w_{B4}}{w_{B43}} J_4' = J_3 + (J_2')_3 + (J_4')_3$$

und zwar muss $J_B + J_3' = \sum_1^5 J_v$ sein.

Schematisch lässt sich diese widerstandstreue Umwandlung in folgender Weise übersichtlich zusammenstellen:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{I1 \parallel II1}{A1 + 12} = \frac{A2 \parallel III2}{B2 + 23} = B23 \\ \frac{I5 \parallel II5}{A5 + 54} = \frac{A4 \parallel III4}{B4 + 43} = B43 \end{array} \right\} B23 \parallel B3 \parallel B43.$$

Ebenso giebt die Verlegung und Zusammenfassung der Ströme das folgende Schema:

$$\begin{array}{c} J_1 \left\{ \begin{array}{l} (J_1)_2 + J_2 = J_2' \quad (J_2')_3 \\ (J_1)_A \end{array} \right\} J_A \quad \text{---} \quad \left\{ \begin{array}{l} (J_2')_B \\ (J_4')_B \end{array} \right\} J_B \quad \left\{ \begin{array}{l} J_3 \\ J_3' \end{array} \right\} \\ J_5 \left\{ \begin{array}{l} (J_5)_A \\ (J_5)_4 + J_4 = J_4' \quad (J_4')_3 \end{array} \right\} J_A \quad \text{---} \quad \left\{ \begin{array}{l} (J_2')_B \\ (J_4')_B \end{array} \right\} J_B \quad \left\{ \begin{array}{l} J_3 \\ J_3' \end{array} \right\} \end{array}$$

Hiernit ist das Netz auf den bereits behandelten Fall dreier paralleler Leitungen [89] zurückgeführt, und wir können nun, rückwärts gehend, die Leiterströme ermitteln. Setzen wir zur Abkürzung

$$g_3 = g_{B23} + g_{II3} + g_{B43}, \quad (g_{B3} \text{ ist } = g_{II3}),$$

so wird nach Gleichung (147):

$$\begin{aligned} J_{B23} &= \frac{g_{B23}}{g_3} J_3' \\ J_{B3} &= J_{II3} = \frac{g_{II3}}{g_3} J_3' \\ J_{B43} &= \frac{g_{B43}}{g_3} J_3'. \end{aligned}$$

J_{B3} ist bereits der wahre in $II3$ fließende Strom, also J_{II3} , da ja von dem Strom J_B kein Anteil auf diese Strecke entfällt. Nun bringen wir wieder die Stromabnahmen J_2' und J_4' an und entlasten zugleich die Punkte B und 3 von den vorher auf sie übertragenen Anteilen dieser Ströme. Andererseits müssen wir zu dem Strom J_{B23} noch den zu J_2' gehörenden Anteil von J_B , nämlich $(J_2')_B$, und ebenso zu J_{B43} den Anteil $(J_4')_B$ addieren, da diese Teilströme ja von B aus geliefert werden, und erhalten so die Leiterströme

$$J_{B2} = J_{B23} + (J_2')_B \quad \text{und} \quad J_{B4} = J_{B43} + (J_4')_B$$

und aus diesen die wahren in 23 und 34 fließenden Ströme

$$J_{23} = J_{B2} - J_2' \quad \text{und} \quad J_{43} = J_{B4} - J_4'.$$

Die Ströme J_{B2} und J_{B4} zerfallen, wie Fig. 99 zeigt, in die Komponenten J_{A2} und J_{III2} bzw. J_{A4} und J_{III4} , und zwar ist

$$J_{A2} = \frac{g_{A2}}{g_{B2}} J_{B2}; \quad J_{III2} = \frac{g_{III2}}{g_{B2}} J_{B2}$$

$$J_{A4} = \frac{g_{A4}}{g_{B4}} J_{B4}; \quad J_{III4} = \frac{g_{III4}}{g_{B4}} J_{B4}.$$

Nunmehr werden wieder unter Entlastung von A , $2'$ und $4'$ die Stromabnahmen 1 und 5 angebracht und daher zu J_{A2} und J_{A4} die Teilströme $(J_1)_A$ und $(J_5)_A$ addiert. So erhalten wir

$$J_{A1} = J_{A2} + (J_1)_A \quad \text{und} \quad J_{A5} = J_{A4} + (J_5)_A$$

und hieraus

$$J_{12} = J_{A1} - J_1 \quad \text{und} \quad J_{54} = J_{A5} - J_5.$$

In gleicher Weise werden schliesslich die Komponenten von J_{A1} und J_{A5} unter Berücksichtigung der Fig. 99 ermittelt zu

$$J_{I1} = \frac{g_{I1}}{g_{A1}} J_{A1}; \quad J_{II1} = \frac{g_{II1}}{g_{A1}} J_{A1}$$

$$J_{I5} = \frac{g_{I5}}{g_{A5}} J_{A5}; \quad J_{II5} = \frac{g_{II5}}{g_{A5}} J_{A5}.$$

Damit ist die Stromverteilung im Netz berechnet.

Um die Rechnung an einem Zahlenbeispiel zu zeigen, geben wir den Beispiel.
Leitfähigkeiten der Leiter die in Fig. 98 beigefügten runden Werte. Die Belastung eines jeden Knotenpunktes sei 100 Amp. Wir erhalten dann der Reihe nach:

$$g_{A1} = 600; \quad w_{A1} = 1.67 \cdot 10^{-8}$$

$$g_{A5} = 600; \quad w_{A5} = 1.67 \cdot 10^{-8}$$

$$(J_1)_A = \frac{5}{6.67} \cdot 100 = 75.0 \quad (J_1)_2 = \frac{1.67}{6.67} \cdot 100 = 25.0$$

$$(J_5)_A = \frac{10}{11.67} \cdot 100 = 85.7 \quad J_2 = \frac{100.0}{J_2' = 125.0}$$

$$J_A = 160.7$$

$$(J_5)_4 = \frac{1.67}{11.67} \cdot 100 = 14.3$$

$$J_4 = \frac{100.0}{J_4' = 114.3}$$

(Kontrolle: $J_A + J_2' + J_4' = J_1 + J_2 + J_4 + J_5 = 400$.)

$$g_{A2} = \frac{1000}{1.67 + 5} = 150.0; \quad g_{A4} = \frac{1000}{1.67 + 10} = 85.6.$$

$$g_{B2} = 200 + 150 = 350 \quad w_{B2} = 2.86 \cdot 10^{-8}$$

$$g_{B4} = 300 + 85.6 = 385.6; \quad w_{B4} = 2.59 \cdot 10^{-8}$$

$$\begin{aligned}
 J_1 &= 160.7 & J_3 &= 100.0 \\
 (J_2')_B &= \frac{5}{7.86} \cdot 125 = 79.5 & (J_2')_3 &= \frac{2.86}{7.86} \cdot 125 = 45.5 \\
 (J_4')_B &= \frac{10}{12.59} \cdot 114.3 = 91.0 & (J_4')_3 &= \frac{2.59}{12.59} \cdot 114.3 = 23.3 \\
 & J_B = 331.2 & & J_3' = 168.8.
 \end{aligned}$$

$(J_B + J_3' = 500 = \Sigma J.)$

$$\begin{aligned}
 g_{B23} &= \frac{1000}{2.86 + 5} = 127.5 \\
 g_{B3} &= 400.0 \\
 g_{B43} &= \frac{1000}{2.59 + 10} = 79.5 \\
 & g_3 = 607.0.
 \end{aligned}$$

Daher wird rückwärts:

$$\begin{aligned}
 J_{B23} &= \frac{127.5}{607} \cdot 168.8 = 35.5 \\
 J_{III3} &= \frac{400}{607} \cdot 168.8 = 111.2 \\
 J_{B43} &= \frac{79.5}{607} \cdot 168.8 = 22.1
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J_{B23} \\ J_{III3} \\ J_{B43} \end{aligned}} \right\} (= 168.8 = J_3')$$

$$\begin{aligned}
 J_{B2} &= 35.5 + 79.5 = 115.0 \\
 J_{B4} &= 22.1 + 91.0 = 113.1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{23} &= 115.0 - 125.0 = -10.0 \\
 J_{43} &= 113.1 - 114.3 = -1.2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{A2} &= \frac{150}{350} \cdot 115.0 = 49.2 \\
 J_{III2} &= \frac{200}{350} \cdot 115.0 = 65.8
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J_{A2} \\ J_{III2} \end{aligned}} \right\} (= 115.0 = J_{B2})$$

$$\begin{aligned}
 J_{14} &= \frac{85.6}{385.6} \cdot 113.1 = 25.0 \\
 J_{III4} &= \frac{300}{385.6} \cdot 113.1 = 88.1
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J_{14} \\ J_{III4} \end{aligned}} \right\} (= 113.1 = J_{B4})$$

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= 49.2 + 75.0 = 124.2 \\
 J_{15} &= 25.0 + 85.7 = 110.7
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{12} &= 124.2 - 100 = 24.2 \\
 J_{14} &= 110.7 - 100 = 10.7
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= \frac{200}{600} \cdot 124.2 = 41.4 \\
 J_{III1} &= \frac{400}{600} \cdot 124.2 = 82.8
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J_{11} \\ J_{III1} \end{aligned}} \right\} (= 124.2 = J_{A1})$$

$$\begin{aligned}
 J_{15} &= \frac{200}{600} \cdot 110.7 = 36.9 \\
 J_{III5} &= \frac{400}{600} \cdot 110.7 = 73.8
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J_{15} \\ J_{III5} \end{aligned}} \right\} (= 110.7 = J_{A5}).$$

Die Stromverteilung ist in Fig. 101 dargestellt. Die Kontrolle der Ströme und Spannungsverluste in den Knotenpunkten ergibt deren Richtigkeit.

Das Wesen der FRIEDSchen Methode der widerstandstreuen Auflösung eines Leitungsnetzes in einen einfachen Leitungsstrang, wie sie bisher entwickelt wurde, besteht darin, dass, von einem oder mehreren kombinierten Zweiecken ausgehend, von n in einem Knotenpunkt zusammenlaufenden Lei-

91.
Wider-
standstreue
Umbildung
des Dreiecks
in einem
Stern und
umgekehrt.
(Kenelly.)

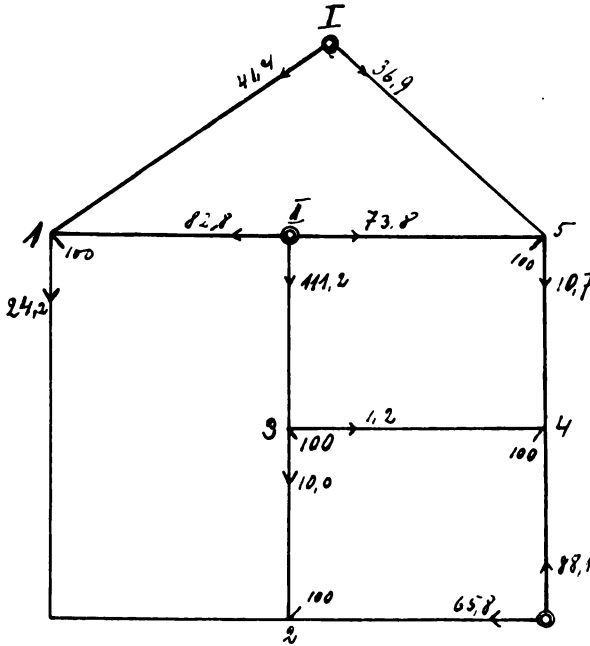


Fig. 101.

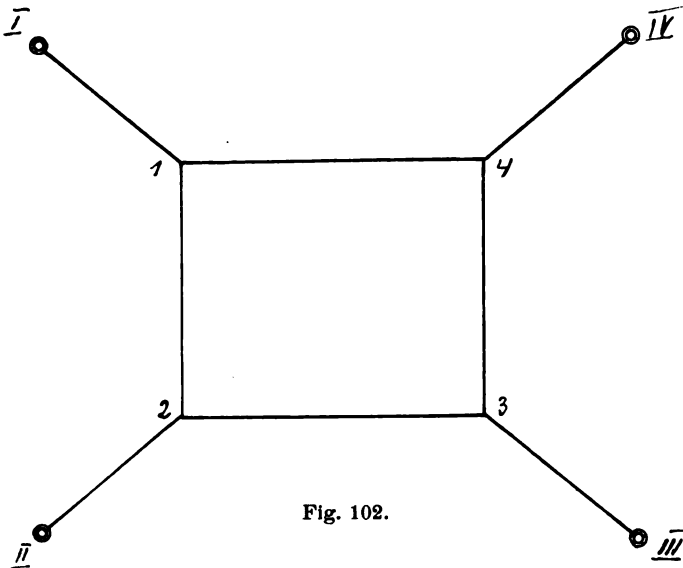


Fig. 102.

tern $n-1$ parallel geschaltete Stränge zu einem äquivalenten Strang zusammengefasst wurden, so dass, ohne Änderung des Potentials des Punktes, dieser den Charakter eines Knotenpunktes verlor, und daher seine Last äquipotentiell auf die nächsten Speise- und Knotenpunkte übertragen werden konnte. Das Verfahren versagt natürlich, wenn es nicht möglich ist, Zwei-

ecke zu bilden, d. h. wenn nach entsprechender Reduktion des Netzes noch Leiterverbindungen übrig bleiben, bei denen zwischen je zwei Speisepunkten mehr als ein Knotenpunkt liegt, also stets, wenn innerhalb des Netzes geschlossene Polygone vorhanden sind, deren Ecken sämtlich Knotenpunkte sind (Fig. 102). In diesem Falle kann man jedoch von einem Satz Gebrauch machen, den zuerst KENELLY¹⁾ angegeben hat und dessen allgemeiner Beweis von HERZOG-FELDMANN²⁾ geliefert worden ist. Dieser Satz lautet:

Es ist stets möglich, ein Leitungs-dreieck unabhängig von den an seinen Eckpunkten herrschenden Potentialen in einen widerstandstreuen Stern und umgekehrt einen Stern in ein widerstandstreues Dreieck so zu verwandeln, dass die Eckpotentiale ungeändert bleiben dadurch, dass man den Stern- bzw. Dreieckswiderständen bestimmte von den ursprünglichen Dreiecks- bzw. Sternwiderständen abhängige Werte erteilt.

Ist (Fig. 103) 1 2 3 das gegebene in einen Stern 10, 20, 30 zu verwandelnde Dreieck, dessen Eckpotentiale ε_1 , ε_2 , ε_3 seien, so wählen wir den

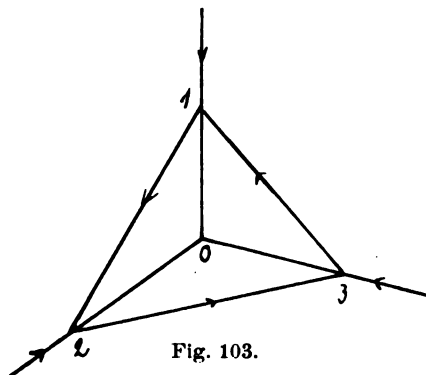


Fig. 103.

Sternpunkt 0 so, dass sein Potential ε_0 den Schwerpunkt des Dreiecks bildet. Dann erhalten wir, da J_{10} die Stromsumme $J_{12} + J_{13}$ ersetzt:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_0 = n_{10} J_{10} = n_{10} (J_{12} + J_{13}) = n_{10} \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{n_{12}} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{n_{13}} \right) \quad (148)$$

und zwei ähnliche Beziehungen für die beiden andern Sternschenkel. Denken wir uns nun die Widerstände der Dreiecksseiten an den gegenüberliegenden Eckpunkten als Gewichte wirkend, so ergibt der aus der Mechanik bekannte Satz über Momente die weitere Beziehung:

$$\varepsilon_1 n_{23} + \varepsilon_2 n_{31} + \varepsilon_3 n_{12} = \varepsilon_0 (n_{12} + n_{23} + n_{31}) \quad (149)$$

Wird nun der hieraus folgende Wert für ε_0 in die drei Gleichungen (148) eingesetzt, so fallen die Potentialdifferenzen $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ und $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ u. s. w. heraus und wir erhalten unabhängig von ihnen als Werte der Sternwiderstände:

1) S. Fussnote 3, S. 136.

2) S. Fussnote 1, S. 136.

$$\left. \begin{aligned} w_{10} &= \frac{w_{12} w_{13}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \\ w_{20} &= \frac{w_{23} w_{21}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \\ w_{30} &= \frac{w_{31} w_{32}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (150)$$

In Worten: Der Schenkelwiderstand des Sterns ist gleich dem Produkt der anliegenden Seitenwiderstände des Dreiecks dividiert durch die Summe der Dreieckswiderstände.

Eine ganz ähnliche Überlegung ergibt, wenn wir die Leitfähigkeit jedes Sternschenkels als Gewicht an dem äusseren Punkte des zugehörigen Schenkels wirken lassen, die Beziehungen für die Umwandlung des Sterns in ein Dreieck:

$$\left. \begin{aligned} g_{12} &= \frac{g_{10} g_{20}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \\ g_{23} &= \frac{g_{20} g_{30}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \\ g_{31} &= \frac{g_{30} g_{10}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (151)$$

Die Leitfähigkeit eines Dreieckswiderstandes ist gleich dem Produkt der Leitfähigkeiten der anliegenden Sternschenkel dividiert durch die Summe der Sternleitfähigkeiten.

Beide Formelreihen (150) und (151) lassen sich zu den folgenden für das Gedächtnis bequemen gemeinsamen Gleichungen vereinigen:¹⁾

$$\left. \begin{aligned} w_{10} w_{23} = w_{20} w_{31} = w_{30} w_{12} &= \frac{w_{12} w_{23} w_{31}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \\ g_{12} g_{30} = g_{23} g_{10} = g_{31} g_{20} &= \frac{g_{10} g_{20} g_{30}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \end{aligned} \right\} \dots \dots (152)$$

Gehen wir dann rückwärts wieder vom Stern auf das Dreieck bzw. vom Dreieck auf den Stern zurück, so werden, wie sich leicht zeigen lässt, die früheren Widerstände bzw. Leitfähigkeiten wiedererhalten. Denn es ergibt sich z. B. für den ersten Fall (Dreiecksumbildung zum Stern) bei der Rückumbildung nach Gleichung (151):

$$w_{12} = \frac{1}{\frac{1}{g_{12}}} = \frac{g_{10} + g_{20} + g_{30}}{g_{10} g_{20}} = \frac{\frac{1}{w_{10}} + \frac{1}{w_{20}} + \frac{1}{w_{30}}}{\frac{1}{w_{10} w_{20}}}$$

und daher nach Gleichung (150):

$$w_{12} = \frac{1}{\frac{w_{12} w_{13}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}}} + \frac{1}{\frac{w_{23} w_{21}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}}} + \frac{1}{\frac{w_{31} w_{32}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}}} = w_{12}^2 + w_{23}^2 + w_{31}^2 = w_{12}$$

Hieraus folgt aber, dass wir dieses Verhalten der Widerstände und Leitfähigkeiten der äquivalenten Dreiecks- und Sterngebilde mit Vorteil zur

1) J. K. SUMEC, Z. f. E. 1903, S. 624 a.

Kontrolle der Rechnung benutzen können, indem wir rückwärts aus den Neuberechneten Widerständen die gegebenen Leitfähigkeiten und umgekehrt berechnen (vgl. das folgende Beispiel).

Wie HERZOG-FELDMANN weiterhin gezeigt haben, ist es nicht möglich, allgemein ein Mehreck unabhängig von den Potentialen der Eckpunkte durch das gleiche Verfahren in einen mehrschenkligen Stern zu verwandeln, da die Eckpotentiale sich aus den Ausdrücken für die Schenkelwiderstände nicht herausheben.

92.
Übertragung
der Ströme.

Durch die Umbildung eines Dreiecks in einen widerstandstreuen Stern verlieren die Knotenpunkte ihren Charakter als solche, und man kann daher ihre Lasten auf die nächstliegenden Kreuzungspunkte und den Sternpunkt

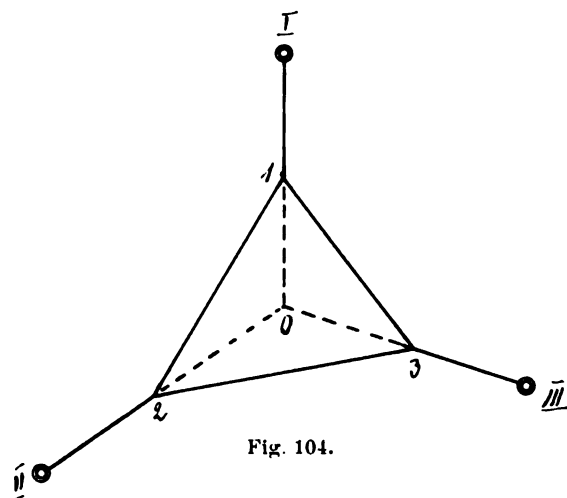


Fig. 104.

äquipotentiell übertragen. Sind die ersteren Speisepunkte (Fig. 104), so wird nach dem Früheren (Gleichung XXV) [69]

$$(J_1)_0 = \frac{w_{11}}{w_{10}} J_1 \text{ u. s. w.}$$

und daraus ergeben sich die Leiterströme nach Gleichung (147) [89] zu:

$$J_{I0} = \frac{g_{I0}}{g_{I0} + g_{II0} + g_{III0}} \left\{ (J_1)_0 + (J_2)_0 + (J_3)_0 \right\}$$

und ähnlich J_{II0} und J_{III0} .

Gehen wir andererseits rückwärts vom Stern wieder auf das Dreieck, so sind zunächst die vorher entlasteten Knotenpunkte wieder durch Rückverlegung der Teilströme $(J_1)_I$, $(J_1)_0$ u. s. w. zu belasten, und es folgt daher, da in der Teilstrecke $I1$ nunmehr ausser dem Strom J_{I0} auch der Teilstrom $(J_1)_I$ fließt:

$$J_{I1} = J_{I0} + (J_1)_I; \quad J_{II2} = J_{II0} + (J_2)_{II}; \quad J_{III3} = J_{III0} + (J_3)_{III}$$

wie bereits in [90] dargelegt. Daher wird der Leiterstrom in den Sternschenkeln:

$$J_{I0} = J_{I1} - J_1; \quad J_{20} = J_{II2} - J_2; \quad J_{30} = J_{III3} - J_3.$$

Für die Berechnung von J_{12} , J_{23} und J_{31} aus J_{10} , J_{20} und J_{30} wissen wir, dass die Potentiale der Endpunkte vor und nach der Umwandlung die gleichen sind, dass also

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{20}$$

ist. Daher wird

$$J_{12} = \frac{1}{n_{12}} (J_{10} n_{10} - J_{20} n_{20}) = g_{12} \left(\frac{J_{10}}{g_{10}} - \frac{J_{20}}{g_{20}} \right) \quad (153)$$

und ähnlich J_{23} und J_{31} .

Bei der Verwandlung des Sterns in ein Dreieck dagegen ergibt sich die Übertragung der Belastung des Sternpunktes J_0 auf die Eckpunkte des widerstandstreuen Dreiecks nach HERZOG-FELDMANN¹⁾ in folgender Weise: Die in den Sternschenkeln fließenden Ströme sind:

$$\left. \begin{aligned} J_{10} &= (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) g_{10} \\ J_{20} &= (\varepsilon_2 - \varepsilon_0) g_{20} \\ J_{30} &= (\varepsilon_3 - \varepsilon_0) g_{30} \end{aligned} \right\} \quad (154)$$

und ihre Summe giebt

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) g_{10} + (\varepsilon_2 - \varepsilon_0) g_{20} + (\varepsilon_3 - \varepsilon_0) g_{30} = J_0,$$

woraus

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_1 g_{10} + \varepsilon_2 g_{20} + \varepsilon_3 g_{30} - J_0}{g_{00}} \quad (155)$$

wenn, wie früher,

$$g_{00} = g_{10} + g_{20} + g_{30}.$$

Wird dieser Wert in die Gleichungen (154) eingesetzt, so folgt

$$\begin{aligned} J_{10} &= \varepsilon_1 g_{10} - \frac{g_{10}}{g_{00}} (\varepsilon_1 g_{10} + \varepsilon_2 g_{20} + \varepsilon_3 g_{30}) + J_0 \frac{g_{10}}{g_{00}} \\ &= i_1 + J_1, \end{aligned}$$

wenn die beiden ersten Glieder zu dem Teilstrom i_1 zusammengefasst werden. Ähnliche Ausdrücke werden für J_{20} und J_{30} erhalten. Die Leiterströme J_{10} , J_{20} und J_{30} bestehen also aus einer Komponente, die nur von den Potentialen in 1, 2 und 3, nicht aber von der Belastung J_0 , und aus einer solchen, die nur von J_0 , nicht aber von den Eckpotentialen des Dreiecks abhängen. Diese letzten Teilströme J_1 , J_2 und J_3 können also, ohne die Potentiale zu ändern, von den bezüglichen Eckpunkten 1, 2 und 3 abgezweigt werden und bilden daher die Komponenten der Sternbelastung für die Ecken des Dreiecks, während die anderen Komponenten i_1 , i_2 und i_3 als von den Eckpotentialen abhängige Kompensationsströme aufzufassen sind, die sich aber gegenseitig aufheben, wie durch Addition der betreffenden Ausdrücke leicht zu ersehen ist. Es wird also:

$$J_1 = \frac{g_{10}}{g_{00}} J_0; \quad J_2 = \frac{g_{20}}{g_{00}} J_0; \quad J_3 = \frac{g_{30}}{g_{00}} J_0 \quad (156)$$

d. h. aber, die Verlegung des Stromes J_0 auf die Ecken des Dreiecks erfolgt so, als wenn diese gleiche Potentiale hätten (Gleichung 147) [89].

1) Elektrische Leitungsnetze.

Bei der Rückkehr vom Dreieck zum Stern ergeben sich die den Leiterströmen des Dreiecks entsprechenden Schenkelströme des Sterns durch einfache Addition der ersteren:

$$J_{01} = J_{21} + J_{31}; \quad J_{02} = J_{32} + J_{12}; \quad J_{03} = J_{13} + J_{23}. \quad (157)$$

Beispiel.

Die FRICK-KENNELLYsche Methode ermöglicht es nun, auch sehr komplizierte Netze schrittweise in einen einfachen Leitungsstrang umzuwandeln.

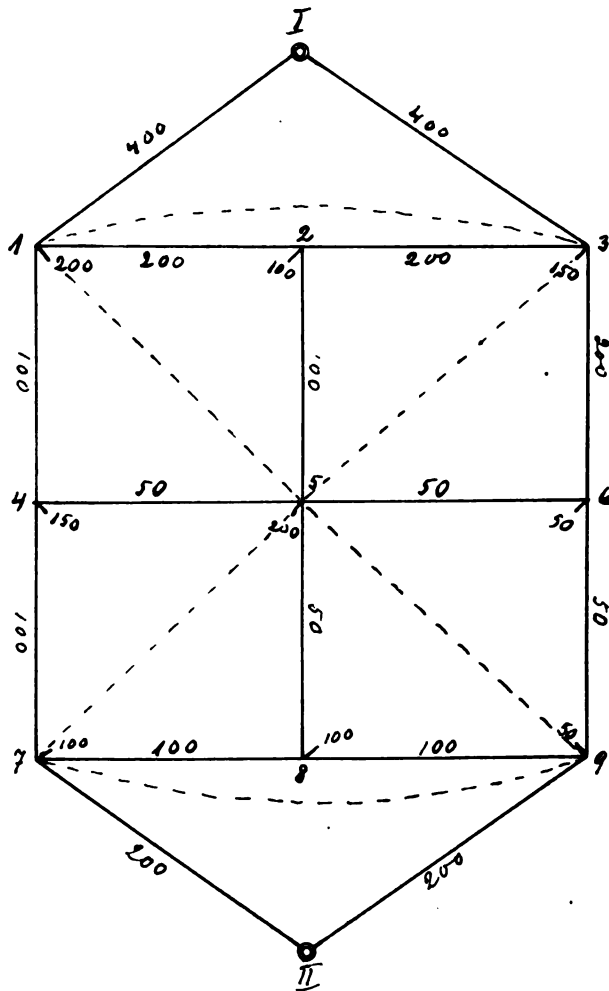


Fig. 105.

Als Beispiel möge die Stromverteilung in dem in Fig. 105 dargestellten Netze bestimmt werden. Die Zahlen an den Knotenpunkten sind deren Belastungen in Amp., die den Leitern beigefügten Zahlen bedeuten Leitfähigkeiten, denen in Klammern die Widerstandswerte in Milliohm hinzugefügt sind. Bei der Rechnung mit Widerständen benutzen wir der Bequemlichkeit wegen die Milliohm-Zahlen, d. h. wir lassen den Faktor 10^{-3} fort und berücksichtigen ihn nur bei der Umrechnung der Widerstände in Leitfähigkeiten.

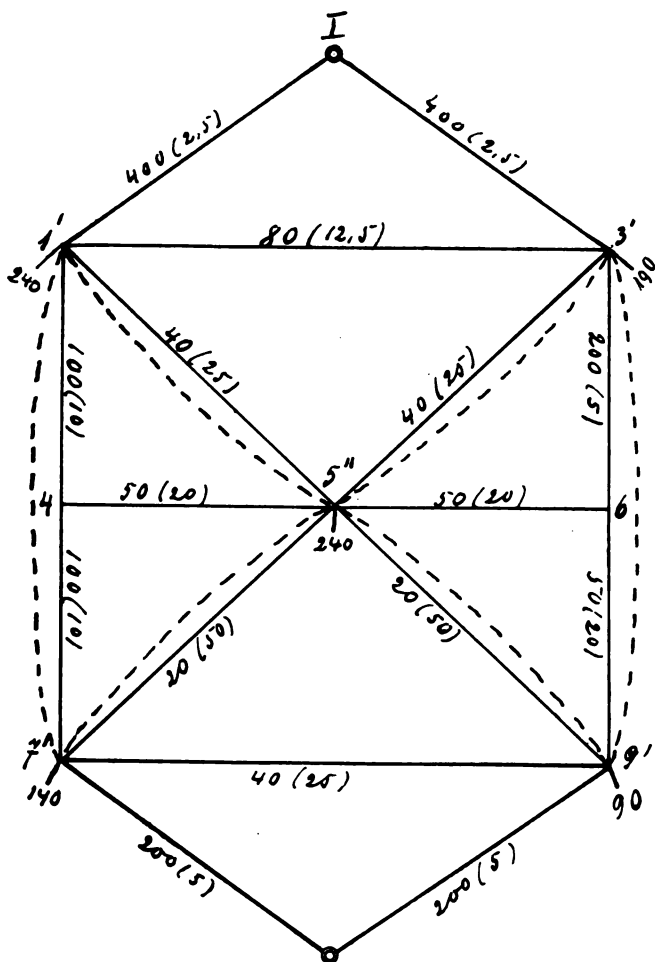


Fig. 106.

Umbildung des Sterns 2 in Dreieck 135 (Fig. 105 u. 106).

$$(J_2)_1 = \frac{200}{500} \cdot 100 = 40 \quad g_{13} = \frac{200 \cdot 200}{500} = 80; \quad n_{13} = 12,5$$

$$J_1 = \frac{200}{240}$$

$$J'_1 = 240 \quad g_{35} = \frac{200 \cdot 100}{500} = 40; \quad n_{35} = 25,0$$

$$(J_2)_3 = \frac{200}{500} \cdot 100 = 40$$

$$J_3 = \frac{150}{190}$$

$$J'_3 = 190 \quad (Kontrolle: n_{12} = \frac{12,5 \cdot 25}{62,5} = 5,0)$$

$$(J_2)_5 = \frac{100}{500} \cdot 100 = 20$$

$$J_5 = \frac{200}{220}$$

$$J'_5 = 220$$

$$n_{52} = \frac{25 \cdot 25}{62,5} = 10,0$$

$$n_{32} = \frac{25 \cdot 12,5}{62,5} = 5,0.$$

7. Dreieck 1a7 (Fig. 109 und 110).

$$w_{1b} = \frac{25 \cdot 4.88}{63.9} = 1.91; \quad g_{1b} = 524 \quad (g_{1a} = \frac{524 \cdot 385}{984} = 204.6)$$

$$w_{ab} = \frac{4.88 \cdot 34}{63.9} = 2.60; \quad g_{ab} = 385 \quad g_{a7} = \frac{385 \cdot 75.2}{984} = 29.4$$

$$w_{7b} = \frac{34 \cdot 25}{63.9} = 13.3; \quad g_{7b} = 75.2 \quad g_{71} = \frac{75.2 \cdot 524}{984} = 40.0$$

$$w_{I1} = 2.50$$

$$w_{1b} = 1.91$$

$$w_{Ib} = 4.41; \quad g_{Ib} = 226.8.$$

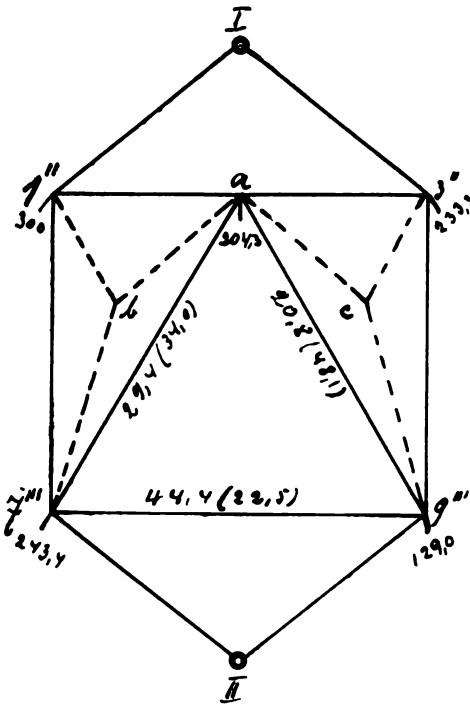


Fig. 109.

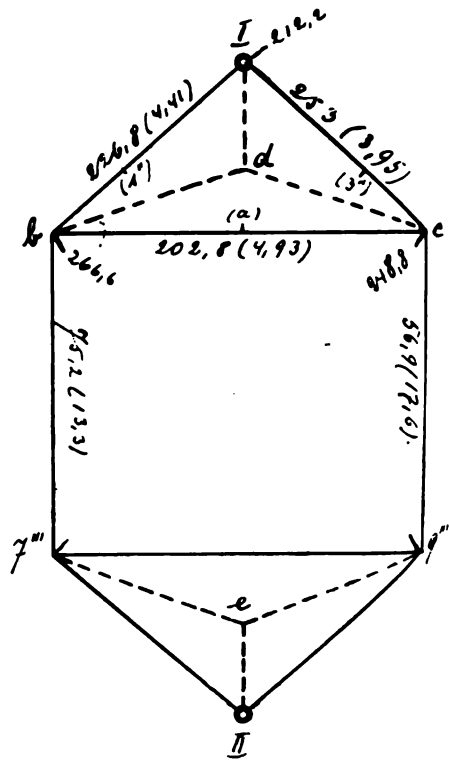


Fig. 110.

8. Dreieck 3a9 (Fig. 109 und 110).

$$w_{ac} = \frac{48.1 \cdot 3.98}{82.1} = 2.33; \quad g_{ac} = 429 \quad (g_{a3} = \frac{429 \cdot 688}{1174} = 251)$$

$$w_{3c} = \frac{3.98 \cdot 30}{82.1} = 1.453; \quad g_{3c} = 688 \quad g_{39} = 33.3$$

$$w_{9c} = \frac{30 \cdot 48.1}{82.1} = 17.56; \quad g_{9c} = 56.9 \quad g_{9a} = 20.8$$

$$w_{I3} = 2.50$$

$$w_{ab} = 2.60$$

$$w_{3c} = 1.45$$

$$w_{ac} = 2.33$$

$$w_{Ic} = 3.95; \quad g_{Ic} = 253; \quad w_{bc} = 4.93; \quad g_{bc} = 202.8$$

$$\begin{aligned}
 (J''_1)_b &= \frac{2.5}{4.41} \cdot 300 = 170.0 & (J''_3)_c &= \frac{2.5}{3.953} \cdot 223.3 = 141.1 & (J''_1)_I &= \frac{1.91}{4.41} \cdot 300 = 130.0 \\
 (J_a)_b &= \frac{2.33}{4.93} \cdot 204.3 = 96.6 & (J_a)_c &= \frac{2.6}{4.93} \cdot 204.3 = 107.7 & (J''_3)_I &= \frac{1.453}{3.953} \cdot 223.3 = 82.2 \\
 J_b &= 266.6 & J_c &= 248.8 & J_I &= 212.2 \\
 (J_b + J_c + J_I + J'''_7 + J'''_9) &= 266.6 + 248.8 + 212.2 + 243.4 + 129.0 \\
 &= 1100 = \Sigma J.
 \end{aligned}$$

9. Dreieck Ibc (Fig. 110 und 111).

$$\begin{aligned}
 w_{Id} &= \frac{3.95 \cdot 4.41}{13.29} = 1.310; & g_{Id} &= 764. & (g_{Ib} &= \frac{764 \cdot 611}{2057} = 227 \\
 w_{bd} &= \frac{4.41 \cdot 4.93}{13.29} = 1.637; & g_{bd} &= 611. & g_{bc} &= 203 \\
 w_{cd} &= \frac{4.93 \cdot 3.95}{13.29} = 1.467; & g_{cd} &= 682. & g_{cI} &= 254).
 \end{aligned}$$

10. Dreieck II79 (Fig. 110 und 111).

$$\begin{aligned}
 w_{IIe} &= \frac{5 \cdot 5}{32.5} = 0.770; & g_{IIe} &= 1298. & (g_{II7} &= 200 = g_{II9} \\
 w_{7e} &= \frac{5 \cdot 22.5}{32.5} = 3.46; & g_{7e} &= 289. & g_{79} &= 44.5) \\
 w_{9e} &= \frac{22.5 \cdot 5}{32.5} = 3.46; & g_{9e} &= 289. \\
 w_{b7} &= 13.3 & w_{b7} &= 13.3 & w_{cd} &= 1.47 & w_{c9} &= 17.56 \\
 w_{7e} &= 3.46 & w_{bd} &= 1.64 & w_{c9} &= 17.56 & w_{9e} &= 3.46 \\
 w_{be} &= 16.76 & w_{d7} &= 14.94 & w_{d9} &= 19.03 & w_{ce} &= 21.02 \\
 w_{bd} &= 1.64 & & & w_{9e} &= 3.46 \\
 w_{dbe} &= 18.40 & & & w_{dce} &= 22.49 \\
 g_{dbc} &= 54.4 & & & g_{dce} &= 44.5 \\
 (J_b)_d &= \frac{16.76}{18.40} \cdot 266.6 = 242.9 & (J_b)_c &= \frac{1.64}{18.40} \cdot 266.6 = 23.7 \\
 (J'''_7)_d &= \frac{3.46}{18.40} \cdot 243.4 = 45.8 & (J'''_7)_c &= \frac{14.94}{18.40} \cdot 243.4 = 197.6 \\
 (J_c)_d &= \frac{21.02}{22.49} \cdot 248.8 = 232.6 & (J_c)_e &= \frac{1.47}{22.49} \cdot 248.8 = 16.2 \\
 (J'''_9)_d &= \frac{3.46}{22.49} \cdot 129.0 = 19.8 & (J'''_9)_e &= \frac{19.03}{22.49} \cdot 129.0 = 109.2 \\
 J_d &= 541.1 & J_e &= 346.7.
 \end{aligned}$$

11. Zweieck de (Fig. 111 und 112).

$$\begin{aligned}
 g_{dbe} &= 54.4 & (J_d)_I &= \frac{10.88}{12.19} \cdot 541.1 = 482.9 \\
 g_{dce} &= 44.5 & (J_e)_I &= \frac{0.77}{12.19} \cdot 346.7 = 21.9 \\
 g_{de} &= 98.9 & J_I &= 212.2 \\
 w_{de} &= 10.11 & J'_I &= 717.0 \\
 w_{Id} &= 1.31 & (J_d)_{II} &= \frac{1.31}{12.19} \cdot 541.1 = 58.2 \\
 w_{Ie} &= 11.42 & (J_e)_{II} &= \frac{11.42}{12.19} \cdot 346.7 = 324.8 \\
 w_{IIe} &= 0.77 & J_{II} &= 383.0 \\
 w_{IId} &= 12.19 & (J'_I + J_{II} &= 1100 = \Sigma J). \\
 w_{IIe} &= 10.88.
 \end{aligned}$$

7. Dreieck 1a7 (Fig. 109 und 110).

$$w_{1b} = \frac{25 \cdot 4.88}{63.9} = 1.91; \quad g_{1b} = 524 \quad (g_{1a} = \frac{524 \cdot 385}{984} = 204.6$$

$$w_{ab} = \frac{4.88 \cdot 34}{63.9} = 2.60; \quad g_{ab} = 385 \quad g_{a7} = \frac{385 \cdot 75.2}{984} = 29.4$$

$$w_{7b} = \frac{34 \cdot 25}{63.9} = 13.3; \quad g_{7b} = 75.2 \quad g_{71} = \frac{75.2 \cdot 524}{984} = 40.0$$

$$w_{I1} = 2.50$$

$$w_{1b} = 1.91$$

$$w_{Ib} = 4.41; \quad g_{Ib} = 226.8.$$

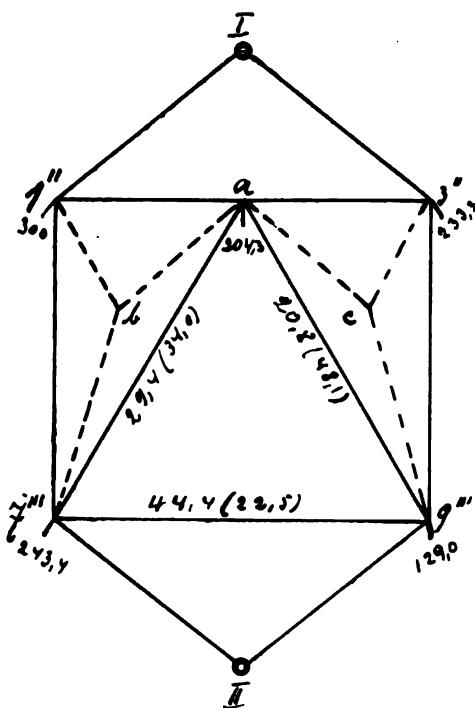


Fig. 109.

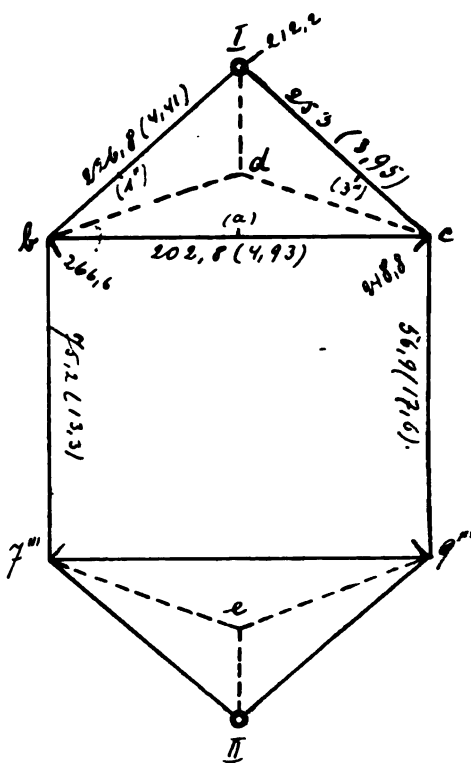


Fig. 110.

8. Dreieck 3a9 (Fig. 109 und 110).

$$w_{ac} = \frac{48.1 \cdot 3.98}{82.1} = 2.33; \quad g_{ac} = 429 \quad (g_{as} = \frac{429 \cdot 688}{1174} = 251$$

$$w_{3c} = \frac{3.98 \cdot 30}{82.1} = 1.453; \quad g_{3c} = 688 \quad g_{39} = 33.3$$

$$w_{9c} = \frac{30 \cdot 48.1}{82.1} = 17.56; \quad g_{9c} = 56.9 \quad g_{9a} = 20.8$$

$$w_{I3} = 2.50$$

$$w_{ab} = 2.60$$

$$w_{3c} = 1.45$$

$$w_{ac} = 2.33$$

$$w_{Ic} = 3.95; \quad g_{Ic} = 253; \quad w_{bc} = 4.93; \quad g_{bc} = 202.8$$

13. Rückkehr zu Dreieck II 79 (Fig. 111 und 110).

Nach Gleichung (153) wird:

$$\begin{aligned} J_{II7} &= 200 (383.0 \cdot 0.77 + 241.3 \cdot 3.46) = \mathbf{226.0} & (J_{II7} + J_{II9} = 383.0 = J_{IIe}) \\ J_{II9} &= 200 (383.0 \cdot 0.77 + 141.7 \cdot 3.46) = \mathbf{157.0} & J_{7II} + J''_{79} = -241.3 = J_{7e} \\ J''_{97} &= 44.4 (241.3 \cdot 3.46 - 141.7 \cdot 3.46) = 15.3 & J_{9II} + J''_{97} = -141.7 = J_{9e}). \end{aligned}$$

14. Rückkehr zu Dreieck Ibc (Fig. 110 u. 109).

$$\begin{aligned} J_{Ib} &= 226.8 (504.8 \cdot 1.310 + 268.7 \cdot 1.637) = 249.9 \\ J_{Ic} &= 253.0 (504.8 \cdot 1.310 + 236.1 \cdot 1.467) = 254.9 \\ J_{bc} &= 202.8 (-268.7 \cdot 1.637 + 236.1 \cdot 1.467) = -18.8 \\ (J_{Ib} + J_{Ic} &= 504.8 = J_{Id} \\ J_{bI} + J_{bc} &= -268.7 = J_{bd} \\ J_{cI} + J_{cb} &= -236.1 = J_{cd}). \end{aligned}$$

Rückverlegung von J_1'' , J_3'' und J_a :

$$\begin{array}{rcl} J_{Ib} = 249.9 & J_{Ic} = 254.9 & J_{bc} = -18.8 \\ + (J_1'') = \underline{130.0} & + (J_3'')_I = \underline{82.2} & + (J_a)_b = \underline{96.6} \\ J_{I1} = \mathbf{379.9} & J_{I3} = \mathbf{337.1} & J_{ba} = 77.8 \end{array}$$

$$\begin{aligned} J_{Ib} &= J_{I1} - J_1'' = 79.9. & J_{3c} &= J_{I3} - J_3'' = 113.8. & J_{ac} &= J_{ba} - J_a = -126.5. \\ (J_{I1} + J_{I3} &= 717.0 = J_I; & J_{Ib} + J_{ab} + J_{7b} &= 0; & J_{ac} + J_{3c} + J_{9c} &= 0.) \end{aligned}$$

15. Rückkehr zu Dreieck 17a und 39a (Fig. 109 u. 108).

$$\begin{aligned} J_{1a} &= 204.9 (79.9 \cdot 1.91 + 77.8 \cdot 2.60) = 72.7 \\ J_{a7} &= 29.37 (-77.8 \cdot 2.60 + 2.1 \cdot 13.3) = -5.1 \\ J_{71} &= 40.0 (-2.1 \cdot 13.3 - 79.9 \cdot 1.91) = -7.2 \\ J_{3a} &= 251.1 (113.8 \cdot 1.453 + 126.5 \cdot 2.33) = 115.7 \\ J_{a9} &= 20.79 (-126.5 \cdot 2.33 - 12.7 \cdot 17.56) = -10.8 \\ J_{93} &= 33.3 (12.7 \cdot 17.56 - 113.8 \cdot 1.453) = 1.9 \end{aligned}$$

$$J_{97}' = \frac{4.41}{44.41} \cdot 15.3 = 1.5$$

$$J_{97} = \frac{40.0}{44.41} \cdot 15.3 = 13.8.$$

$$\begin{aligned} (J_{1a} + J_{17} &= 79.9 = J_{1b} \\ J_{71} + J_{7a} &= -2.1 = J_{7b} \\ J_{a7} + J_{a1} &= -77.8 = J_{ab} \\ J_{3a} + J_{39} &= 113.8 = J_{3c} \\ J_{93} + J_{9a} &= 12.7 = J_{9c} \\ J_{a9} + J_{a3} &= -126.5 = J_{ac} \\ J_{1a} + J_{3a} + J_{7a} + J_{9a} &= 204.3 = J_a). \end{aligned}$$

16. Rückkehr zu Stern 5 (Fig. 108).

$$\begin{aligned} J_{5a}' &= 5.1 + 10.8 = 15.9 & (J_{5a}' + J_{59}' + J_{57}' &= 0). \\ J_{59}' &= -10.8 - 1.5 = -12.3 \\ J_{57}' &= 1.5 - 5.1 = -3.6 \end{aligned}$$

Rückverlegung von J_5^{IV} .

$$\begin{aligned} J_{a5} &= -15.9 + 204.3 = 188.4 & (J_{a5} + J_{75} + J_{95} = 278.4 = J_5^{IV}) \\ J_{75} &= 3.6 + 43.4 = 47.0 & J_{1a} + J_{3a} + J_{5a} = 0 \\ J_{95} &= 12.3 + 30.7 = 43.0 & J_{57} + J_{17} + J_{II7} + J_{97} = 200 = J_7'' \text{ u. s. w.} \end{aligned}$$

17. Rückkehr zu Dreieck 153 (Fig. 108 u. 107).

$$\begin{aligned} J_{13} &= 80.0 & (72.7 \cdot 4.88 - 115.7 \cdot 3.98) &= -8.6 \\ J_{35}'' &= 73.3 & (115.7 \cdot 3.98 + 188.4 \cdot 5.31) &= 107.1 \\ J_{51}'' &= 60.0 & (-188.4 \cdot 5.31 - 72.7 \cdot 4.88) &= -81.3. \\ (J_{I1} + J_{71} + J_{51}'' + J_{31} &= 300.0 = J_1'' \\ J_{I3} + J_{13} + J_{53}'' + J_{93} &= 223.3 = J_3'' \\ J_{I5}'' + J_{35}'' + J_{75} + J_{95} &= 278.4 = J_5^{IV}. \\ J_{15}' &= \frac{20}{60} \cdot 81.3 = 27.1 & J_{15} &= \frac{40}{60} \cdot 81.3 = 54.2 \\ J_{35}' &= \frac{33.3}{73.3} \cdot 107.1 = 48.6 & J_{35} &= \frac{40}{73.3} \cdot 107.1 = 58.5 \\ J_{75}' &= \frac{20}{40} \cdot 47.0 = 23.5 & J_{75} &= \frac{20}{40} \cdot 47.0 = 23.5 \\ J_{95}' &= \frac{8.33}{28.3} \cdot 43.0 = 12.7 & J_{95} &= \frac{20}{28.3} \cdot 43.0 = 30.3. \end{aligned}$$

18. Rückkehr zu Stern 4 und 6 (Fig. 107 u. 106).

$$\begin{aligned} J_{14}' &= 27.1 + 7.2 = 34.3 & (J_{14}' + J_{74}' + J_{54}' &= 0) \\ J_{74}' &= -7.2 + 23.5 = 16.3 \\ J_{54}' &= -23.5 - 27.1 = -50.6 \\ J_{36}' &= 48.6 - 1.9 = 46.7 & (J_{36}' + J_{96}' + J_{56}' &= 0) \\ J_{96}' &= 1.9 + 12.6 = 14.5 \\ J_{56}' &= -12.6 - 48.6 = -61.2. \end{aligned}$$

Rückverlegung von J_4 und J_6 .

$$\begin{aligned} J_{14} &= 34.3 + 60.0 = 94.3 & (J_{I1} + J_{41} + J_{51} + J_{31} &= 240 = J_1') \\ J_{74} &= 16.3 + 60.0 = 76.3 & J_{I3} + J_{13} + J_{53} + J_{93} &= 190 = J_3' \\ J_{54} &= -50.6 + 30.0 = -20.6 & \text{u. s. w.} \\ J_{36} &= 46.7 + 33.3 = 80.0 \\ J_{96} &= 14.5 + 8.4 = 22.9 \\ J_{56} &= -61.2 + 8.3 = -52.9. \end{aligned}$$

19. Rückkehr zu Stern 2 und 8 (Fig. 106 u. 105).

$$\begin{aligned} J_{12}' &= 54.2 - 8.6 = 45.6 & (J_{12}' + J_{32}' + J_{52}' &= 0) \\ J_{32}' &= 8.6 + 58.5 = 67.1 \\ J_{52}' &= -58.5 - 54.2 = -112.7 \\ J_{78}' &= 23.5 - 13.8 = 9.7 & (J_{78}' + J_{98}' + J_{58}' &= 0) \\ J_{98}' &= 13.8 + 30.3 = 44.1 \\ J_{58}' &= -30.3 - 23.5 = -53.8. \end{aligned}$$

Rückverlegung von J_2 und J_8 .

$$\begin{aligned} J_{12} &= 45.6 + 40 = 85.6 & (J_{I1} + J_{21} + J_{41} &= 200 = J_1) \\ J_{32} &= 67.1 + 40 = 107.1 & \text{u. s. w.} \\ J_{52} &= -112.7 + 20 = -92.7 \\ J_{78} &= 9.7 + 40 = 49.7 \\ J_{98} &= 44.1 + 40 = 84.1 \\ J_{58} &= -53.8 + 20 = -33.8. \end{aligned}$$

Die Stromverteilung ist in Fig. 113 dargestellt. Danach berechnen sich die Spannungsverluste in den Knotenpunkten zu

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= 0.95; \quad \varepsilon_2 = 1.38; \quad \varepsilon_3 = 0.84; \quad \varepsilon_4 = 1.89; \quad \varepsilon_5 = 2.30; \quad \varepsilon_6 = 1.24; \\ \varepsilon_7 &= 1.13; \quad \varepsilon_8 = 1.63; \quad \varepsilon_9 = 0.79. \end{aligned}$$

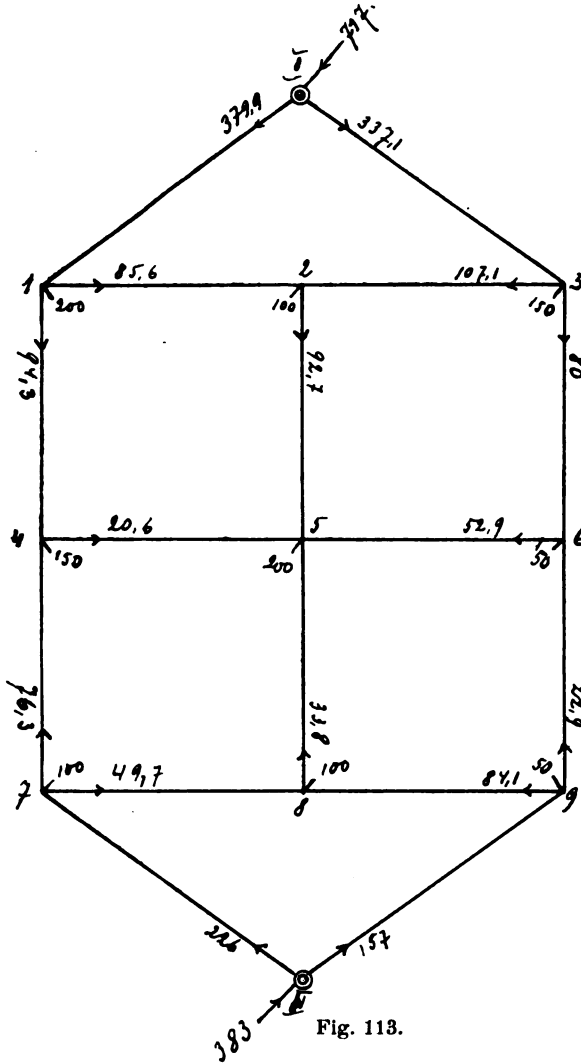


Fig. 113.

Zum Vergleich wollen wir dasselbe Netz mit der gleichen Genauigkeit (5%) nach der Spannungsmethode mittels des GAUSSschen Verfahrens [82] rechnen. Wir erhalten dann die Leitfähigkeiten:

$$\begin{aligned} &= 700 \quad g_{12} = 200 \quad g_{13} = 0 \quad g_{14} = 100 \quad g_{15} = 0 \quad g_{16} = 0 \quad g_{17} = 0 \quad g_{18} = 0 \quad g_{19} = 0 \\ &g_{22} = 500 \quad g_{23} = 200 \quad g_{24} = 0 \quad g_{25} = 100 \quad g_{26} = 0 \quad g_{27} = 0 \quad g_{28} = 0 \quad g_{29} = 0 \\ &g_{33} = 800 \quad g_{34} = 0 \quad g_{35} = 0 \quad g_{36} = 200 \quad g_{37} = 0 \quad g_{38} = 0 \quad g_{39} = 0 \\ &g_{44} = 250 \quad g_{45} = 50 \quad g_{46} = 0 \quad g_{47} = 100 \quad g_{48} = 0 \quad g_{49} = 0 \\ &g_{55} = 250 \quad g_{56} = 50 \quad g_{57} = 0 \quad g_{58} = 50 \quad g_{59} = 0 \\ &g_{66} = 300 \quad g_{67} = 0 \quad g_{68} = 0 \quad g_{69} = 50 \\ &g_{77} = 400 \quad g_{78} = 100 \quad g_{79} = 0 \\ &g_{88} = 250 \quad g_{89} = 100 \\ &g_{99} = 350 \end{aligned}$$

und daraus das Gleichungssystem:

$$\begin{array}{rcl}
 1200 \varepsilon_0 - 400 \varepsilon_1 & - & -400 \varepsilon_3 & - & -200 \varepsilon_7 & - & -200 \varepsilon_9 & = & -1100 \\
 -400 \varepsilon_0 + 700 \varepsilon_1 & - & 200 \varepsilon_3 & - & 100 \varepsilon_4 & - & & = & 200 \\
 & - & 200 \varepsilon_1 & + & 500 \varepsilon_3 & - & 200 \varepsilon_3 & - & 100 \varepsilon_5 & = & 100 \\
 -400 \varepsilon_0 & - & 200 \varepsilon_2 & + & 800 \varepsilon_3 & - & 200 \varepsilon_6 & - & & = & 150 \\
 & - & 100 \varepsilon_1 & - & & + & 250 \varepsilon_4 & - & 50 \varepsilon_5 & - & 100 \varepsilon_7 & - & & = & 150 \\
 & - & & - & 100 \varepsilon_2 & - & 50 \varepsilon_4 & + & 250 \varepsilon_5 & - & 50 \varepsilon_6 & - & 50 \varepsilon_8 & = & 200 \\
 & - & & & 200 \varepsilon_3 & - & 50 \varepsilon_5 & + & 300 \varepsilon_6 & - & & - & 50 \varepsilon_9 & = & 50 \\
 -200 \varepsilon_0 & - & & - & 100 \varepsilon_4 & - & & + & 400 \varepsilon_7 & - & 100 \varepsilon_8 & - & & = & 100 \\
 & - & & - & 50 \varepsilon_5 & - & & - & 100 \varepsilon_7 & + & 250 \varepsilon_8 & - & 100 \varepsilon_9 & = & 100 \\
 -200 \varepsilon_0 & - & & - & & - & 50 \varepsilon_6 & - & & - & 100 \varepsilon_8 & + & 350 \varepsilon_9 & = & 50.
 \end{array}$$

Die Näherungswerte sowie die gesamte Rechnung sind in der folgenden Tabelle IX zusammengestellt.

Es geht hieraus hervor, dass die Rechnung nach dem letzten Verfahren in einem geringen Bruchteil der Zeit zu bewältigen ist, die für die Methode der widerstandslosen Umbildung des Netzes aufzuwenden ist.

93.
Vergleich
der Frick-
Kenelly-
schen mit
der
Spannungs-
methode.

Zur allgemeinen Charakterisierung des FRICK-KENELLYschen Verfahrens wäre noch zu bemerken, dass die Auflösung des Zwei- und Dreiecks in eine Gerade bzw. einen Stern der rechnerischen Elimination eines Stroms in den Gleichungen der Strommethode, die Auflösung eines Sterns in ein Dreieck der rechnerischen Elimination eines Knotenpunkts-Spannungsverlustes in den Gleichungen der Spannungsmethode entspricht. Während aber die Auflösung des Gleichungssystems der letzten Methode durch das GAUSSsche Näherungsverfahren ausserordentlich vereinfacht und von der Erfahrung des Rechnenden fast unabhängig gemacht wird, ist der günstigste und am schnellsten zum Ziele führende Weg für die widerstandstreue Netzbildung bei der Vielheit der möglichen Lösungen durchaus dem Überblick und der Geschicklichkeit des Projektierenden überlassen. Dagegen hat die letzte Methode vor der Spannungsmethode den Vorteil der grösseren Anschaulichkeit und des klareren Einblicks in die Entstehung der Stromverteilung abhängig von dem Leitungsquerschnitt und der Belastung der einzelnen Knotenpunkte voraus, da durch sie die Möglichkeit gegeben ist, die Entstehung der komplizierteren aus den einfacheren Gebilden zu verfolgen. Dass sie aber in Hinsicht auf Rechenaufwand sowie Bequemlichkeit der Rechnungen sowohl dem VERHOECKXschen als besonders dem GAUSSschen Verfahren bedeutend nachsteht, lehrt am besten das vorher berechnete Beispiel.

Die Vereinfachung grosser Netze.

94.
Netzteilung. Kann man in einem Netze, das ein grösseres Verteilungsgebiet mit Strom zu versorgen hat, einzelne Teile — „Bezirke“ —, ohne andere Leiter zu schneiden, durch widerstandslose Verbindung von Speisepunkten abgrenzen, so sind unter der Voraussetzung gleichen Potentials der letzteren diese Bezirke voneinander vollständig unabhängig, ihre Strom- und Spannungsverteilung kann also gesondert bestimmt werden. Ist diese natürliche Unterteilung in Bezirke nicht möglich oder enthalten solche Bezirke noch sehr viele Knotenpunkte, so dass eine unbequem grosse Zahl von Gleichungen zu lösen ist, so kann man oft dadurch kleinere Bezirke bilden, dass man Verbindungen zwischen Speisepunkten herstellt, die nur wenige —

Tabelle IX.

	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
1	— 0·8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 11000	2000	1000	1500	1500	2000	500	1000	1000	500
2	—	—	—	—	—	1·0	—	—	—	—	— 1400	— 1200	1000	— 1700	1500	2000	500	— 600	1000	— 1100
3	—	—	—	—	1·0	—	—	—	—	—	— 1400	— 1200	2000	— 1700	2000	— 500	1000	— 600	1500	— 1100
4	—	—	—	—	—	—	—	—	0·6	—	— 1400	— 200	2000	— 1700	— 500	0	1000	400	1500	— 1100
5	—	—	0·4	—	—	—	—	—	—	—	— 1400	— 200	2000	— 1700	— 500	300	1000	1000	0	— 500
6	—	—	—	—	—	0·4	—	—	—	—	— 1400	600	0	— 900	— 500	700	1000	1000	0	— 500
7	—	—	—	—	—	0·4	—	—	—	—	— 1400	600	0	— 100	— 500	900	— 200	1000	0	— 300
8	—	—	—	—	—	—	—	0·3	—	—	— 1400	600	400	— 100	— 300	— 100	0	1000	200	— 300
9	—	—	—	—	—	—	—	—	0·2	—	— 800	600	400	— 100	0	— 100	0	— 200	500	— 300
10	—	0·1	—	—	—	—	—	—	—	—	— 800	600	400	— 100	0	0	0	0	0	— 100
11	—	—	0·1	—	—	—	—	—	—	—	— 400	— 100	600	— 100	100	0	0	0	0	— 100
12	— 0·04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 400	100	100	100	100	100	0	0	0	— 100
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 0·05	80	— 60	100	— 60	100	100	0	— 80	0	— 180
14	—	—	—	—	—	0·04	—	—	—	—	— 20	— 60	100	— 60	100	100	— 25	— 80	— 50	— 5
15	—	—	—	—	0·05	—	—	—	—	—	— 20	— 60	140	— 60	120	0	— 5	— 80	— 30	— 5
16	—	—	0·03	—	—	—	—	—	—	—	— 20	— 10	140	— 60	— 5	25	— 5	— 30	— 30	— 5
17	—	—	—	—	—	0·02	—	—	—	—	— 20	50	— 10	0	— 5	55	— 5	— 30	— 30	— 5
18	—	—	—	—	—	—	—	— 0·01	—	—	— 20	50	10	0	5	5	5	— 30	— 20	— 5
19	—	—	—	—	—	—	—	—	— 0·01	—	— 40	50	10	0	— 5	5	5	10	— 30	— 5
20	—	0·01	—	—	—	—	—	—	—	—	— 40	50	10	0	— 5	0	5	0	— 5	— 15
21	—	—	0·01	—	—	—	—	—	—	—	0	— 20	30	0	5	0	5	0	— 5	— 15
											0	0	— 20	20	5	10	5	0	— 5	— 15
											— 0·84	0·11	0·54	0·00	1·05	1·46	0·40	0·29	0·79	— 0·05
$-\epsilon_0 =$											0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84
											0·95	1·38	0·84	1·89	2·30	1·24	1·13	1·63	0·79	0·79

eine oder zwei — Leitungen schneiden. Man berechnet diese kleineren Bezirke unter vorläufiger Vernachlässigung der geschnittenen Leiter mit mässiger Annäherung zunächst für sich und rechnet erst dann mit den so erhaltenen Näherungswerten der Knotenpunktverluste das Netz als Ganzes durch.

So würde das Netz nach Fig. 114 ohne weiteres eine Teilung in drei Bezirke ermöglichen, von denen der grössere *III IV III VII I* unter vorläufiger

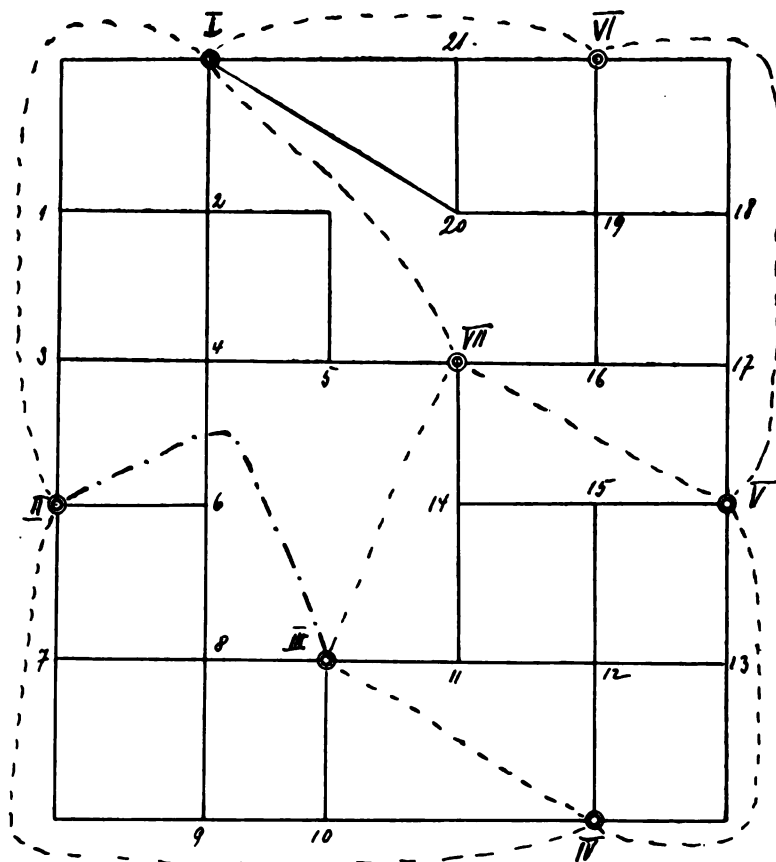


Fig. 114.

Vernachlässigung der Strecke 4 6 in zwei kleinere geteilt werden kann, die nach Bestimmung der ersten Annäherungen für ε_1 bis ε_{10} wieder gemeinsam als Ganzes zu behandeln sind.

Die Netzberechnung auf Ausgleich.

95.
Wesen der
Ausgleichs-
rechnung.

Ist nun durch die Bestimmung der Strom- und Spannungsverteilung an einem vorliegenden Netz dargethan, dass es bei maximaler Belastung den Anforderungen der Elastizität entspricht, d. h. dass an keiner Stelle desselben der Spannungsverlust eine bestimmte, durch die Bedingung der Elastizität vorgeschriebene Grösse überschreitet, und dass die Stromdichte der Leiter

den Bedingungen der Feuersicherheit genügt, so ist schliesslich die Frage zu prüfen, ob diese Voraussetzungen auch noch erfüllt sind, wenn die Belastung des Netzes sich ändert (verringert).

Bisher wurde stets angenommen, dass die Speisepunkte gleiches Potential besitzen, und das ist bei voller Belastung auch der Fall, wenn, wie es in der Praxis stets geschieht, die Speiseleitungen so bemessen werden, dass sie bei Zuführung des auf jeden Speisepunkt entfallenden Stromes den gleichen Spannungsverlust ergeben. Ändert sich aber die Belastung an einer oder mehreren Verbrauchsstellen, so tritt eine andere Stromverteilung als die für volle Belastung berechnete ein; die Folge ist, dass die Speiseleitungsströme ebenfalls eine Änderung erfahren, die natürlich im allgemeinen nicht proportional den Leitungswiderständen ist, so dass nunmehr die Potentiale der Speisepunkte verschiedene Werte annehmen werden.

Wären nun die Spannungsverluste in den Speisekabeln so bemessen, dass bei maximaler Belastung die durch die Netz elastizität bedingte Grenze nicht überschritten wird ($\epsilon_s \leq 0.03 \text{ E}$), so könnte auch bei geringerer Stromentnahme die Grenze nicht überschritten werden. In der Praxis werden jedoch für die Speisekabel wesentlich grössere Verluste zugelassen, da andernfalls die Kosten des Netzes zu hoch werden würden. Dagegen wird

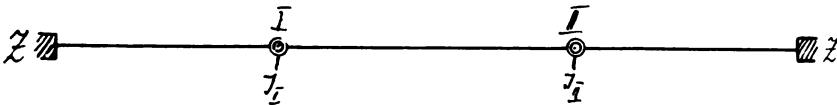


Fig. 115.

durch Regelung der Maschinenspannung die Spannung an den Speisepunkten konstant gehalten, und zwar entweder an jedem einzelnen, wozu wiederum teure Regulierapparate für jede einzelne Speiseleitung notwendig sind, die ausserdem den Betrieb komplizieren, oder, wie es allgemein bei grösseren Netzen geschieht, an einzelnen wenigen Gruppen von Speisepunkten oder auch nur an allen zugleich, indem die mittlere Netzspannung auf der gewünschten Höhe erhalten wird. In diesem Falle verlieren die Speisepunkte offenbar den Charakter von solchen und nehmen den einfacher Knotenpunkte an, während die Punkte gleichen — wenn auch infolge der Regelung der Speisepunkte auf mittlere Spannung nicht konstanten — Potentials nunmehr an die auf der Sammelschiene der Centrale vereinigten Enden der Speisekabel rücken. Auch für diesen Fall können wir die entsprechenden Gleichungen gemäss [76] mit den Spannungsverlusten an den Knoten- und Speisepunkten als Unbekannten aufstellen und werden dann vermittle der Grössen $q_{\mu\nu}$, die wir gelegentlich der VERHOECKXschen Methode [83] kennen gelernt haben, zu einfachen Beziehungen für den Ausgleich kommen [101 ff.]. Um die für die Ausgleichsrechnungen wichtigen Grössen abzuleiten, werden wir jedoch zunächst den einfachsten Fall betrachten, nämlich den Ausgleich zwischen zwei belasteten Speisepunkten.

Es sei (Fig. 115) ZIII die Darstellung eines einfachsten Netzes mit den Speisepunkten I und II, den Speiseleitungen ZI und ZII und der Verteilungsleitung III, in der bei voller Belastung der maximale Spannungsverlust nicht überschritten wird. Die für den letzten Fall sich ergebenden Speisepunktsbelastungen J_I und J_{II} seien allein an den Punkten I und II

96.
Ausgleich
zwischen
zwei
belasteten
Speise-
punkten.

wirkend gedacht; der Widerstand der Speiseleitungen w_I und w_{II} ist so bemessen, dass

$$w_I J_I = w_{II} J_{II} = \varepsilon_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (158)$$

da ja die Speiseleitungsströme $J_{0I} = J_I$ und $J_{0II} = J_{II}$ werden.

Vermindert sich nun die Netzbelastung von $J_I + J_{II}$ auf den Wert $J_I' + J_{II}'$, wobei $J_I' = \eta_I J_I$ und $J_{II}' = \eta_{II} J_{II}$ diejenigen, ebenfalls an I und II angreifenden Teilströme sind, die die Speisepunkte bei äquipotentieller Übertragung der Einzellasten auf sie zu liefern hätten, also dann, wenn sie gleiches Potential hätten, und η_I und η_{II} der Bedingung unterworfen sind:

$$0 \leq \eta \leq 1,$$

so können wir ohne weiteres nach dem Früheren [63 oder 65] mit Hilfe der bekannten Leiterwiderstände w_I , w_{II} und w_{III} die neue Stromverteilung berechnen. Es seien $i_{0I} = \gamma_I J_I$ und $i_{0II} = \gamma_{II} J_{II}$ die beiden durch ZI und ZII fließenden Teilströme, dann sind auch die Grössen γ der Bedingung unterworfen:

$$0 \leq \gamma \leq 1.$$

Man erkennt dies aus folgender Überlegung: Es ist, wenn wir $w_I + w_{II} + w_{III} = w_{00}$ setzen:

$$i_{0I} = \frac{w_{00} - w_I}{w_{00}} J_I' + \frac{w_{II}}{w_{00}} J_{II}'$$

oder

$$\gamma_I J_I = \left(1 - \frac{w_I}{w_{00}}\right) \eta_I J_I + \frac{w_{II}}{w_{00}} \eta_{II} J_{II}$$

$$\gamma_{II} J_{II} = \frac{w_I}{w_{00}} \eta_I J_I + \left(1 - \frac{w_{II}}{w_{00}}\right) \eta_{II} J_{II},$$

also

$$\gamma_I J_I + \gamma_{II} J_{II} = \eta_I J_I + \eta_{II} J_{II}$$

$$\gamma_I J_I - \gamma_{II} J_{II} = \left(1 - 2 \frac{w_I}{w_{00}}\right) \eta_I J_I - \left(1 - 2 \frac{w_{II}}{w_{00}}\right) \eta_{II} J_{II},$$

daher unter Berücksichtigung, dass $w_I J_I = w_{II} J_{II}$ ist:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_I &= \eta_I - \frac{w_I}{w_{00}} (\eta_I - \eta_{II}) \\ \gamma_{II} &= \eta_{II} - \frac{w_{II}}{w_{00}} (\eta_{II} - \eta_I) \end{aligned} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (159)$$

Da nun η_{II} und η_I zwischen 0 und 1 schwanken können, $\frac{w_I}{w_{00}}$ und $\frac{w_{II}}{w_{00}}$ aber echte Brüche sind, so folgt für die Grenzwerte der γ

$$0 \leq \gamma \leq 1.$$

Es ist weiterhin auch ersichtlich, dass γ die Grenzen 0 und 1 nur erreichen kann, einerseits wenn zugleich η_I und η_{II} verschwinden, d. h. wenn überhaupt keine Belastung vorhanden ist, und andererseits, wenn

$$\eta_I = \eta_{II} = 1,$$

d. h. bei voller Belastung.

Ferner ist unter Berücksichtigung von Gleichung (158)

$$\varepsilon_I = i_{0I} w_I = \gamma_I \varepsilon_s; \quad \varepsilon_{II} = i_{0II} w_{II} = \gamma_{II} \varepsilon_s \quad . \quad . \quad . \quad (160)$$

daher wird

$$\varepsilon_{III} = \varepsilon_{II} - \varepsilon_I = \varepsilon_s (\gamma_{II} - \gamma_I) = \varepsilon_s (\eta_{II} - \eta_I) \left(1 - \frac{w_I + w_{II}}{w_{00}}\right) \quad (161)$$

Die Gleichheit der Potentiale in *I* und *II* ist also nunmehr, wie bereits die allgemeine Betrachtung ergab, gestört und daher fließt in *III* ein Strom

$$J_{III} = \frac{\varepsilon_{III}}{w_{III}} = i_I - J'_I = J_I (\gamma_I - \eta_I) = J_I (\eta_{II} - \eta_I) \frac{w_I}{w_{00}} \quad (162)$$

Wenn aber

$$\eta_I = \eta_{II} = \eta,$$

d. h. wenn die Belastung an beiden Speisepunkten in gleichem Verhältnis fällt, so wird auch

$$\gamma_I = \gamma_{II} = \gamma = \eta \text{ und } \varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \gamma \varepsilon_s, \quad \varepsilon_{III} = 0 \text{ und } J_{III} = 0,$$

wie aus den Gleichungen (159) bis (162) folgt, d. h. der Spannungsverlust ist in beiden Speisekabeln, wie bei voller Belastung, der gleiche und gleich

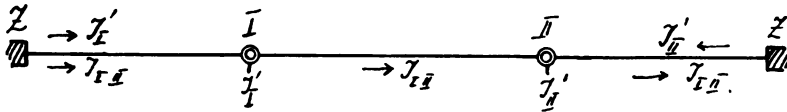


Fig. 116.

dem γ - bzw. η -fachen von ε_s . Da aber die Spannung an den Speisepunkten konstant erhalten wird, so ist in diesem Falle durch die Veränderung der Belastung überhaupt keine Wirkung auf das Verteilungsnetz merkbar.

Aus der Gleichung (162) können wir auch die Beziehung ableiten:

$$\begin{aligned} i_{0I} &= J'_I + J_{III} \\ i_{0II} &= J'_{II} - J_{III} \end{aligned}$$

d. h. die Speisekabel führen ausser den von ihnen zu liefernden Belastungsströmen der Speisepunkte noch einen Kreisstrom J_{III} (s. Fig. 116), der sich den ersteren überlagert. Zwischen *I* und *II* fließt nur dieser Kreisstrom J_{III} und durch ihn wird eben der Spannungsunterschied ε_{III} zwischen *I* und *II* hervorgerufen.

Setzen wir

$$\bar{\varepsilon}_{III} = J'_{II} w_{II} - J'_I w_I = \varepsilon_s (\eta_{II} - \eta_I) \quad . \quad . \quad . \quad (163)$$

bezeichnen wir also mit $\bar{\varepsilon}_{III}$ denjenigen Potentialunterschied, der zwischen den Punkten *I* und *II* herrschen würde, wenn keine Verbindung zwischen ihnen vorhanden wäre, so erhalten wir aus Gleichung (161)

$$\varepsilon_{III} = J_{III} w_{III} = \bar{\varepsilon}_{III} \left(1 - \frac{w_I + w_{II}}{w_I + w_{II} + w_{III}}\right) \quad (164)$$

also

$$\frac{\varepsilon_{III}}{\bar{\varepsilon}_{III}} = \frac{w_{III}}{w_I + w_{II} + w_{III}}$$

und

$$\bar{\varepsilon}_{III} = J_{III} (w_I + w_{II} + w_{III}) \quad . \quad . \quad . \quad (165)$$

Aus Gleichung (164) ist ersichtlich, dass $\varepsilon_{II} < \bar{\varepsilon}_{II}$. Wir können also mit Berücksichtigung von Gleichung (165) sagen: $\bar{\varepsilon}_{II}$ ist diejenige Spannung, die den Kreisstrom J_{II} in dem Gesamtwiderstand des Kreises $w_I + w_{II} + w_{II}$ hervorruft; durch ihn wird der Potentialunterschied $\bar{\varepsilon}_{II}$, der zwischen den Punkten I und II bei offenem Stromkreise herrschen würde, auf den geringeren Wert ε_{II} herabgedrückt.

J_{II} wird daher der „Ausgleichsstrom“¹⁾ genannt, weil er die zwischen zwei nicht miteinander verbundenen Punkten eines Netzes herrschende Potentialdifferenz $\bar{\varepsilon}_{II}$ infolge ihrer Verbindung durch eine Leitung vom Widerstande w_{II} auf den Wert ε_{II} „ausgleicht“.

Wir erkennen also aus den bisher entwickelten Gleichungen das Folgende: Wird die Stromentnahme eines nur an den Speisepunkten belasteten Netzes geändert (vermindert), so entstehen zwischen den letzteren Potentialunterschiede, wenn $\eta_I > \eta_{II}$ (Gleichung 161). Diese sind am grössten, wenn keine Verteilungsleitungen zwischen ihnen vorhanden sind [Gleichungen (163) und (164)]. ε_{II} wird um so grösser, je grösser ε_s und je grösser $\eta_{II} - \eta_I$, nimmt also bei gegebenem ε_s seinen grössten Wert ($= \varepsilon_s$) an, wenn ent-

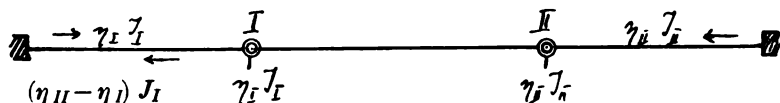


Fig. 117.

weder η_I oder η_{II} verschwindet, während entsprechend η_{II} oder η_I seinen Maximalwert 1 erhält, d. h. wenn die Belastung von I oder II gleich Null wird, während gleichzeitig diejenige von II bzw. I ihr Maximum erreicht.

Da die Maschinenspannung so geregelt wird, dass die mittlere Netzspannung $\frac{1}{2} (E_I + E_{II})$ die gewünschte Grösse erhält, so kann demnach, wenn nur die Speisepunkte belastet sind, im äussersten Falle der zulässige Spannungsverlust überschritten werden, wenn

$$\varepsilon_s > 2 \varepsilon_{max}, \text{ d. h. } \varepsilon_s > 2 \cdot 0.03 \varepsilon$$

ist. In diesem Falle kann jedoch der Spannungsverlust durch Verbindung der Speisepunkte durch eine Leitung $I II$, die „Ausgleichsleitung“, auf jedes gewünschte Mass (mit Ausschluss von Null) ausgeglichen werden, indem w_{II} den entsprechenden Wert erhält.

Wie die Gleichungen (161) und (163) lehren, hängt die thatsächlich eintretende Potentialdifferenz ε_{II} ebenso wie $\bar{\varepsilon}_{II}$ nicht von den absoluten Änderungen der beiden Belastungen J_I und J_{II} , sondern von der Differenz $\eta_{II} - \eta_I$ ab, wie auch daraus erhellt, dass wir jede Belastungsänderung in zwei solche zerlegen können (vgl. Fig. 117), von denen die eine: proportionale

1) Die erste Arbeit über Ausgleichsleitungen, die zugleich die Bezeichnungen „Ausgleichsleitungen, Spannungsausgleich“ festlegt, rührt von C. DIHLMANN her: Über Disposition und über Berechnung von Leitungsnetzen ... ETZ 1889, S. 148. Vgl. auch ARTHUR LIETKE: Über die Berechnung des Ausgleichs ... ETZ 1892, S. 426; J. THOMMÜLLER, Die Ausgleichsleitungen ... ETZ 1901, S. 229, dessen Darstellung wir hier für einfache Verteilungsleiter im wesentlichen folgen, sowie auch B. SOSCHINSKI, Die Ausgleichsrechnungen in geschlossenen Leitungsnetzen ... ETZ 1905, S. 1069.

Verminderung von J_{II} auf $\eta_{II} J_{II}$ und von J_I auf $\eta_I J_I$ ($\eta_{II} > \eta_I$) die Potentiale von I und II infolge der Regelung der Maschinenspannung überhaupt nicht berührt, während die zweite, den Punkt I allein betreffende Änderung von $\eta_{II} J_I$ auf $\eta_I J_I$, also der Gegenstrom

$$\Delta J_I = (\eta_{II} - \eta_I) J_I$$

die Potentialdifferenz

$$\bar{\varepsilon}_{I II} = \bar{\varepsilon}_{II} - \bar{\varepsilon}_I = 0 - (-\Delta J_I w_I) = \Delta J_I w_I$$

hervorrufen, die infolge $w_{I II}$ auf $\varepsilon_{I II}$ ausgeglichen wird oder werden soll. Wir können also, ohne die Allgemeinheit der Untersuchung zu beschränken, bei Ausgleichsrechnungen stets annehmen, dass nur der oder die untersuchten Punkte Änderungen unterliegen, während alle anderen voll belastet sind. Dann wird also $\eta_{II} = 1$ und $1 - \eta_I = u_I$ die in Teilen von J_I ausgedrückte Belastungsänderung, und es ist

$$\Delta J_I = (1 - \eta_I) J_I = u_I J_I$$

derjenige negative Teilstrom von J_I , der (bei offenem Stromkreise) die Erhöhung des Potentials von I gegenüber II verursacht:

$$\bar{\varepsilon}_{I II} = \Delta J_I w_I = u_I J_I w_I = u_I p_s \mathcal{E} \quad . \quad . \quad . \quad (166)$$

wobei

$$J_I w_I = \varepsilon_s = p_s \mathcal{E}$$

gesetzt worden ist. Drücken wir auch $\varepsilon_{I II}$ in Prozents von \mathcal{E} aus, indem wir

$$\varepsilon_{I II} = p \mathcal{E}$$

schreiben, so erhalten wir:

$$\frac{\varepsilon_{I II}}{\varepsilon_{I II}} = \frac{u_I}{p} p_s = a_{I II} p_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (167)$$

worin die Grösse

$$a_{I II} = \frac{u_I}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (168)$$

nach TEICHMÜLLER¹⁾ der „Ausgleich“ des Punktes I in bezug auf II genannt wird, und diejenige prozentuale Verminderung darstellt, die die Belastung des Punktes I bei sonst unveränderten Netzverhältnissen erfahren muss, um eine thatsächliche Potentialdifferenz zwischen I und II von 1% der Netzspannung hervorzurufen. Die Grösse des Ausgleichs ist durch die Gleichung (168) eindeutig bestimmt, und zwar ist

$$a_{I II} = \frac{u_I}{p}$$

zu wählen, wenn als grösste Belastungsänderung des Punktes I der Betrag $u_I J_I$ zu erwarten ist und eine grösste Potentialdifferenz von $\varepsilon_{I II} = p \mathcal{E}$ zwischen I und II zugelassen wird. Im besonderen wird für $p = 0.01$ der Ausgleich gleich der prozentualen Belastungsänderung:

$$\eta_I) 100.$$

a_{II} ist also eine Grösse, die ebenso wie ε_{II} charakteristisch für den Ausgleich des Netzes ist. Während ε_{II} eine bestimmte Grösse nicht übersteigen darf, darf a_{II} einen bestimmten Wert nicht unterschreiten, soll das Netz unter allen Bedingungen seinen Zweck, den Lampen Strom von innerhalb geringer Grenzen konstanter Spannung zuzuführen, genügen.

Aus den Gleichungen (164) und (167) folgt die Hauptgleichung für die Bestimmung der Ausgleichsgrösse gegebener Netze:

$$a_{II} = \frac{n_I + n_{II} + n_{III}}{n_{III}} \cdot \frac{1}{p_s} = [(n_I + n_{II}) g_{III} + 1] \frac{1}{p_s} \quad (\text{XXVIII})$$

und aus Gleichung (168) der a_{II} entsprechende thatsächlich vorhandene Potentialunterschied zwischen I und II :

$$p = \frac{u_I}{a_{II}} \text{ bzw. } \varepsilon_{II} = p \varepsilon = \frac{u_I}{a_{II}} \varepsilon \quad . \quad . \quad (\text{XXIX})$$

Schreiben wir Gleichung (XXVIII) mit TEICHMÜLLER¹⁾ in der Form:

$$a_{II} = \frac{1}{2} [g_I + (1 + f_{III}) g_{III}] \frac{E^2}{\mathfrak{E}_I} \quad . \quad . \quad (\text{XXVIII a})$$

die erhalten wird, wenn

$$p_s = \frac{2 J_I n_I}{E} = \frac{2 \mathfrak{E}_I n_I}{E^2}$$

und

$$f_{III} = \frac{n_{II}}{n_I}$$

in die Gleichung (XXVIII) eingesetzt wird, wobei \mathfrak{E}_I die von der Speiseleitung I zu übertragende Energie und E die Netzspannung bedeutet, so sehen wir, dass bei gegebenen Netzwideständen der Ausgleich mit dem Quadrat der Netzspannung und umgekehrt proportional zu der von der Leitung zu übertragenden Leistung wächst. Soll ferner bei gegebenem E und \mathfrak{E} der Ausgleich verbessert werden, so ist dies nur dadurch möglich, dass g_{III} , g_I und g_{II} , also die Leiterquerschnitte vergrössert werden, wobei f_{III} unter allen Umständen unverändert bleibt, da infolge Gleichung (158) stets

$$\frac{n_{II}}{n_I} = \frac{J_I}{J_{II}}$$

sein muss. Schliesslich erhellt noch aus der Gleichung (XXVIII a), dass die Vergrösserung von g_{III} wesentlich mehr zur Verbesserung des Ausgleichs beiträgt, als die Vergrösserung von g_I und g_{II} bzw. die Verkleinerung von p_s .

Was schliesslich die Berechnung der den Ausgleichsgrössen entsprechenden Leiterquerschnitte betrifft, so sind in der Praxis zwei Fälle zu unterscheiden: Entweder sollen bei einem zu projektierenden Netze die auf Verteilung berechneten Leitungen auf Ausgleich nachgeprüft und für den Fall, dass sie nicht genügen, die stärkeren Querschnitte ermittelt werden, oder es stellt sich bei einem vorhandenen, in Betrieb befindlichen Netze eine zu grosse Potentialdifferenz zwischen zwei Speisepunkten heraus, und es soll eine un-

1) ETZ 1901, S. 231.

mittelbare Verbindung, eine Ausgleichsleitung zwischen ihnen verlegt werden, deren Querschnitt zu berechnen ist.

Im ersten Falle ist (Fig. 116) die Belastungsänderung u_I und die zulässige Potentialdifferenz $\epsilon_{I II}$ und damit nach Gleichung (168) auch der Ausgleich $a_{I II}$ gegeben bzw. gefordert. Der Mindestquerschnitt des Leiters $I II$ ergibt sich daher aus Gleichung (XXVIII). Es ist:

$$\left. \begin{aligned} g_{I II} &= \frac{1}{w_I + w_{II}} = \frac{a_{I II} p_s - 1}{w_I + w_{II}} \\ q_{I II} &= \frac{a_{I II} p_s - 1}{w_I + w_{II}} l_{I II} \varrho \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (XXX)$$

Ist der auf Verteilung berechnete Querschnitt kleiner, so muss er auf diesen letzten Wert verstärkt werden.

Im zweiten Falle ist $g_{I II}$ und u_I gegeben. Die mit Hilfe der Gleichungen (XXVIII) und (XXIX) ermittelten Ausgleichsgrößen $a_{I II}$ und p bzw. $\epsilon_{I II} = p \mathcal{E}$ genügen nicht und sollen dadurch auf $a'_{I II}$ erhöht bzw. auf $\epsilon'_{I II}$

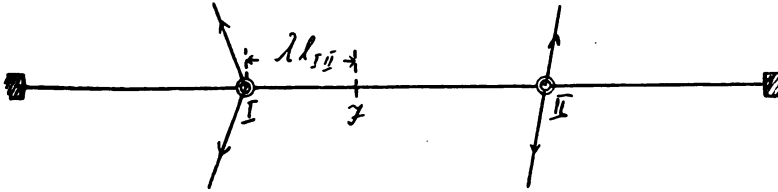


Fig. 118.

herabgedrückt werden, dass eine weitere Verbindung zwischen $I II$ von der Leitfähigkeit $g'_{I II}$ verlegt wird. Dann giebt Gleichung (XXVIII) für die beiden Ausgleichsgrößen:

$$\begin{aligned} a'_{I II} &= [(w_I + w_{II}) (g_{I II} + g'_{I II}) + 1] \frac{1}{p_s} \\ a_{I II} &= [(w_I + w_{II}) g_{I II} + 1] \frac{1}{p_s} \end{aligned}$$

also durch Subtraktion

$$\Delta a_{I II} p_s = (a'_{I II} - a_{I II}) p_s = (w_I + w_{II}) g'_{I II}$$

woraus

$$\left. \begin{aligned} g'_{I II} &= \frac{\Delta a_{I II} p_s}{w_I + w_{II}} \\ q'_{I II} &= \frac{\Delta a_{I II} p_s}{w_I + w_{II}} l_{I II} \varrho \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (XXXI)$$

folgt.

Die Gleichungen (XXVIII) bis (XXXI) bilden die Hauptgleichungen für Ausgleichsberechnungen.

Betrachten wir nunmehr den Fall, dass ausser den Strömen J_I und J_{II} , die entweder unmittelbar bei I und II oder in anderen von I und II abgezweigten Leitern verbraucht werden können, eine einzige Abzweigung J auf der Strecke $I II$ vorhanden ist, und zwar in der Entfernung

$$\lambda l_{I II} \quad (0 \leq \lambda \leq 1),$$

97.
Ausgleich
bei mit nur
einer Strom-
entnahme
belasteten
Verteilungs-
leitungen.

Fig. 118. Es soll untersucht werden, wie die Berechnung auf Ausgleich

den auf Verteilung berechneten Querschnitt q_n des Leiters I II beeinflussen würde, falls J allein sich ändert.

Nach Gleichung (XXI) und (XXII) [63] berechnet sich der Querschnitt q_n zu

$$q_n = (1 - \lambda) \lambda J \frac{l \varrho}{\varepsilon} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (169)$$

Betrachten wir λ als Veränderliche, so sehen wir, dass q_n um so kleiner und damit um so mehr der Nachrechnung auf Ausgleich bedürftig wird, je mehr J an I oder II heranrückt. Für $\lambda = 0$ und $\lambda = 1$ erhalten wir den vorher betrachteten Fall der ausschliesslichen Belastung in den Speisepunkten und es wird $q_n = 0$. Der Leiter ist dann ausschliesslich auf Ausgleich zu berechnen (Gleichung XXX). Sein Maximum erreicht q_n für $\lambda = 0.5$, wenn also J in der Mitte der Strecke liegt, und dann ist die Wahrscheinlichkeit am geringsten, dass die Berechnung auf Ausgleich eine Querschnittsvergrösserung zur Folge haben könnte. Ferner beeinflusst J den Querschnitt der Speisekabel I und II im Verhältnis zu den Teilströmen $(1 - \lambda) J$ und λJ , und zwar um so bedeutender, je grösser diese im Verhältnis zu dem Rest der von I und II geführten Speiseströme sind. Drücken wir demnach, um w_I und w_{II} von J abhängig zu machen, J_I und J_{II} in Teilen von J aus, schreiben wir also

$$J_I = n (1 - \lambda) J; \quad J_{II} = m \lambda J,$$

so wird

$$w_I = \frac{\varepsilon_s}{n (1 - \lambda)} J; \quad w_{II} = \frac{\varepsilon_s}{m \lambda} J$$

also

$$w_I + w_{II} = \frac{(m - n) \lambda + n}{m n (1 - \lambda) \lambda} \frac{\varepsilon_s}{J}.$$

Hieraus ersehen wir, dass $w_I + w_{II}$ abhängig von λ , m und n ein Minimum wird, wenn $m = n$ und $\lambda = 0.5$ ist; wir leiten daraus die Forderung ab, dass die Speisepunkte nicht an Orten starken Verbrauchs, sondern möglichst im Schwerpunkt benachbarter grosser Verbraucher anzuordnen sind, damit die benachbarten Speiseleitungen eine Belastung erhalten, die umgekehrt proportional ist zur Entfernung von den letzteren. Am günstigsten, in Übereinstimmung mit dem vorigen Ergebnis, wonach q_n für $\lambda = 0.5$ am wenigsten einer Verstärkung infolge Ausgleichs bedurfte, ist es, wenn die Speisepunkte so gelegt werden, dass starke Verbrauchsstellen in der Mitte zwischen ihnen liegen.

Nehmen wir nun an, dass das Netz dieser Bedingung gemäss dimensioniert ist, so dass also $m = n$, so vereinfacht sich der oben erhaltene Ausdruck zu

$$w_I + w_{II} = \frac{p_s}{n (1 - \lambda) \lambda} \frac{\varepsilon}{J} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (170)$$

wenn wir zugleich $\varepsilon_s = p_s \varepsilon$ einführen. Daher wird nach Gleichung (XXX), wenn q_n den auf Ausgleich berechneten Querschnitt bezeichnet:

$$q_n = \left(a_{II} - \frac{1}{p_s} \right) n (1 - \lambda) \lambda l_{II} \varrho \frac{J}{\varepsilon} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (171)$$

und folglich, wenn in Gleichung (169) ε durch $p_s \varepsilon$ ausgedrückt wird:

$$\frac{q_n}{q_n} = \left(a_{II} - \frac{1}{p_s} \right) n p_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (172)$$

Die Formeln (170) bis (173) gehen für $\lambda = 0.5$ in die letzten vier Gleichungen über, können also mit ihnen unmittelbar verglichen werden. Dies ist der Grund, weswegen der Proportionalitätsfaktor $\frac{n}{2}$ bei der Bedingungsgleichung für J_I und J_{II} eingeführt wurde.

Die aus den Gleichungen (170) bis (173) gezogenen Schlüsse bezüglich der Notwendigkeit der Ausgleichsrechnung, die auch für die letzten Gleichungen gelten, müssen nun noch durch die Diskussion der Lage der Belastung J vervollständigt werden. Ist J unmittelbar von I oder II abgezweigt, $\lambda = 0$ oder $= 1$, so wird, wenn etwa wegen anderer geringerer oder nicht berücksichtigter Belastungen eine Verbindung $I II$ besteht, der Ausgleich $a_{I II}$ am kleinsten, nämlich gleich $\frac{1}{p}$; daher ist die Notwendigkeit, auf Ausgleich nachzurechnen und gegebenen Falls die Verteilungsleitung zu verstärken, am grössten. Der Ausgleich wird, wie früher, am grössten, wenn $\lambda = 0.5$.

Gehen wir nun dazu über, J wirklich um uJ kleiner werden zu lassen, so müssen wir zunächst die Grössen $a_{I II}$ und $\bar{\epsilon}_{I II}$ neu bestimmen, da ihre Definition nach Gleichung (167) und (166) hier nicht mehr unmittelbar anwendbar ist. Zu diesem Zwecke haben wir, um die neuen Belastungen der Speisepunkte I und II festzustellen, anstatt J die Grösse $\eta J = (1 - u)J$ äquipotentiell auf diese zu übertragen und erhalten daher:

$$\begin{aligned}\eta_I J_I &= J_I - J(1 - \lambda) + \eta J(1 - \lambda) = J_I - Ju(1 - \lambda) \\ \eta_{II} J_{II} &= J_{II} - J\lambda + \eta J\lambda = J_{II} - Ju\lambda.\end{aligned}$$

Durch Änderung der Belastung J werden also stets beide Speisepunkte in Mitleidenschaft gezogen, indem beider Belastung vermindert wird. Es folgt also:

$$u_I = \eta_{II} - \eta_I = \frac{J}{J_I} u(1 - \lambda) - \frac{J}{J_{II}} u\lambda = uJ \left(\frac{1 - \lambda}{J_I} - \frac{\lambda}{J_{II}} \right)$$

und

$$\Delta J_I = u_I J_I = uJ [1 - \lambda(1 + f_{III})],$$

da nach der früheren Bezeichnung

$$\frac{J_I}{J_{II}} = \frac{w_{II}}{w_I} = f_{III}$$

ist, und ferner

$$\epsilon_{III} = \Delta J_I w_I = uJ w_I [1 - \lambda(1 + f_{III})] = u(J)_I w_I \quad (174)$$

wenn

$$(J)_I = J[1 - \lambda(1 + f_{III})] \quad (175)$$

gesetzt wird. $u(J)_I$ ist also, wie früher [96] ΔJ_I , als derjenige Strom aufzufassen, der, das Speisekabel I von I nach Z durchströmend, die Spannungserhöhung $\bar{\epsilon}_{I II}$ hervorbringt.

Für

$$f_{III} > \frac{1 - \lambda}{\lambda}, \text{ also } \lambda > \frac{1}{1 + f_{III}}$$

wird $(J)_I$ negativ, d. h. ϵ_{III} und damit J_{III} wird negativ, der Ausgleichsstrom fliesst von II nach I . Man hat in diesem Falle den Ausgleich des Punktes II zu betrachten und kann daher schreiben:

$$-\bar{\varepsilon}_{III} = \bar{\varepsilon}_{III} = u (J)_{II} w_{II} \quad . \quad . \quad . \quad (174 a)$$

$$(J)_{II} = J [\lambda - (1 - \lambda) f_{III}] \quad . \quad . \quad . \quad (175 a)$$

wenn

$$f_{III} = \frac{w_I}{w_{II}}.$$

Hierin ist, wie unmittelbar folgt, für $f_{III} > \frac{1-\lambda}{\lambda}$

$$f_{III} < \frac{\lambda}{1-\lambda},$$

also $(J)_{II}$ und damit $\bar{\varepsilon}_{III}$ bzw. J_{III} positiv.

Für

$$\lambda = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

wird $(J)_I = 0$, also auch $\bar{\varepsilon}_{III} = 0$, d. h. wenn die Speiseleitungswiderstände w_I und w_{II} sich verhalten, wie die Widerstände der anliegenden Teilstrecken λw_{III} und $(1 - \lambda) w_{III}$ der Verteilungsleitung, so kann überhaupt keine Potentialdifferenz zwischen den Speisepunkten I und II auftreten, wie sehr sich auch die Belastung J ändert. Dieses Verhältnis der Widerstände wird in den folgenden beiden Fällen vorhanden sein: erstens wenn J die einzige bzw. die bei weitem überwiegende Belastung des betrachteten Netzteils ist, und zweitens wenn die ausser J vorhandenen Belastungen der Speisepunkte sich zu einander verhalten wie $\frac{\lambda}{1-\lambda}$. Dasselbe ist der Fall, wenn bei beliebigem f_{III} die (einzige) der Veränderung unterworfenen Belastung in der Entfernung

$$\lambda l_{III} = \frac{1}{1 + f_{III}} l_{III}$$

vom Speisepunkte I liegt.

Die Gleichung (174) ist nun mit der Gleichung (166) identisch und definiert daher die Grösse $\bar{\varepsilon}_{III}$, wenn an Stelle von u , der der Änderung von J entsprechende Faktor u und an Stelle von J_I der nach Gleichung (175) in bezug auf I reduzierte Belastungsstrom $(J)_I$ tritt. Sie geht für $\lambda = 0$ (und $\lambda = 1$) in die Gleichung (166) über und schliesst daher den vorher behandelten Fall der ausschliesslich an den Speisepunkten angreifenden Belastungen ein. Schreiben wir in Anlehnung an Gleichung (166):

$$\bar{\varepsilon}_{III} = u p_s \frac{(J)_I}{J_I} \mathcal{E},$$

so erhalten wir

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{III}}{\varepsilon_{III}} = \frac{u}{p} \frac{(J)_I}{J_I} p_s = a_{III} p_s \quad . \quad . \quad . \quad (167 a)$$

wo jetzt

$$a_{III} = \frac{u}{p} \frac{(J)_I}{J_I} \quad . \quad . \quad . \quad (168 a)$$

die Definitionsgleichung für den Ausgleich des Speisepunktes I gegen II ist. Setzen wir ferner

$$a_{III} = a \frac{(J)_I}{J_I},$$

also

$$a = a_{III} \frac{J_I}{(J)_I} = \frac{u}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (176)$$

so bedeutet a diejenige prozentuale Verminderung, die J erfahren muss, damit die Spannungsschwankung ε_{III} gleich $0.01 \mathcal{E}$ wird.

An die Stelle der Gleichungen (XXIX) treten also jetzt die Gleichungen:

$$p = \frac{u}{a} = \frac{u}{a_{III}} \frac{(J)_I}{J_I}; \quad \varepsilon_{III} = p \mathcal{E} = \frac{u}{a_{III}} \frac{(J)_I}{J_I} \mathcal{E} \quad . \quad (XXIX a)$$

Die übrigen Hauptgleichungen für die Ausgleichsberechnung, nämlich die Gleichungen (XXVIII), (XXX) und (XXXI) bleiben unverändert bestehen, da ja die in ihnen vorkommenden Grössen bis auf a_{III} von der Last J unabhängig sind, a_{III} aber eine den neuen Verhältnissen entsprechende Bedeutung durch Gleichung (168 a) erhalten hat.

Für den eben behandelten Fall, dass nur eine Belastung der Änderung unterliegt, können wir auch die Bedingung aufstellen, der der Ausgleichsstrom genügen muss, damit der Spannungsverlust an der Abzweigungsstelle keinen grösseren Wert annimmt, als für volle Belastung berechnet war. Der Spannungsverlust ε bei voller Belastung ist

$$\varepsilon = \lambda (1 - \lambda) w_{III} J,$$

dagegen, nachdem J um uJ vermindert worden, nach Gleichung (116) [68]:

$$\varepsilon' = \lambda w_{III} [J_{III} + \eta (1 - \lambda) J].$$

Soll also $\varepsilon' \leq \varepsilon$ sein, so muss

$$J_{III} + \eta (1 - \lambda) J < (1 - \lambda) J,$$

d. h.

$$J_{III} = \frac{\varepsilon_{III}}{w_{III}} < (1 - \lambda) u J$$

sein. Für

$$u = 0.4, \quad \lambda = 0.5$$

z. B. darf der Ausgleichsstrom den Wert

$$J_{III} = 0.2 J$$

nicht überschreiten. Für die gegebenen Verhältnisse ist weiterhin

$$\varepsilon = 0.25 J w_{III},$$

also wird

$$\varepsilon_{III} = J_{III} w_{III} = 0.8 \varepsilon,$$

d. h. wenn ε z. B. 2% von \mathcal{E} beträgt, so darf ε_{III} 1.6% betragen, es ist also:

$$p = 0.016 \quad \text{und} \quad a = \frac{0.4}{0.016} = 25.$$

Es würde also in diesem Falle ein Ausgleich $a = 25$ bezogen auf J genügen.

Für $\lambda = 0.2$ dagegen würde sich ergeben:

$$J_{III} = 0.32 J; \quad \varepsilon = 0.16 w_{III} J; \quad \varepsilon_{III} = 2 \varepsilon = 0.04 \varepsilon; \quad a = 10.$$

Mit dem Fall der Einzelbelastung J ist zugleich der Fall der gleichmässig verteilten Belastung von der Gesamtgrösse J' erledigt, da ja diese sich durch eine einzige Belastung von der Grösse $J = \frac{1}{2} J'$ in der Mitte des Leiters III und zwei an I und II angreifenden Belastungen $\frac{J'}{4}$ ersetzen lässt [64]. Da in diesem Falle der auf Verteilung berechnete Leiterquerschnitt halb so gross wird, als wenn der Strom J' in seiner vollen Grösse in der Mitte der Leitung abgezweigt würde, so ist die Notwendigkeit auf Ausgleich nachzurechnen bei gleichmässig verteilter Belastung entsprechend grösser.

Sind mehrere Einzellasten J_v , die um $u_v J$ kleiner werden können, zu berücksichtigen, wobei die Belastungen der Speisepunkte selbst durch die Grenzwerte 0 und 1 für λ eingeschlossen sind, so wird in ähnlicher Weise:

$$\left. \begin{aligned} \Delta J_I &= \Sigma u_v (J_v)_I \\ (J_v)_I &= J_v [1 - \lambda_v (1 + f_{III})] \\ \bar{\varepsilon}_{III} &= p_s \varepsilon \Sigma u_v \frac{(J_v)_I}{J_I} \end{aligned} \right\} \dots \dots (175 \text{ b})$$

98.
Ausgleich
bei gleich-
mässig ver-
teilter Be-
lastung.

99.
Ausgleich
bei
mehreren
von der
Verteilungs-
leitung ab-
gezweigten
Belastungen.

Daher tritt an die Stelle der Gleichung (168 a) die Gleichung:

$$a_{III} = \Sigma \frac{u_v}{p} \frac{(J_v)_I}{J_I} \dots \dots (168 \text{ b})$$

und an die Stelle der Gleichungen (XXIX a) die folgenden:

$$p = \frac{\Sigma u_v (J_v)_I}{a_{III} J_I}; \quad \varepsilon_{III} = \frac{\Sigma u_v (J_v)_I}{a_{III} J_I} \cdot \varepsilon \dots \dots (XXIX \text{ b})$$

während die Gleichungen (XXVIII), (XXX) und (XXXI) bestehen bleiben.

Auch hier können wir die Grösse $a_v = \frac{u_v}{p}$ einführen, die angiebt, um wieviel Prozent die betrachteten Belastungen J_v zugleich verkleinert werden müssen, damit der Potentialunterschied ε_{III} 1% der Nutzspannung betrage. Wird $u_v = u = \text{constans}$, so erhalten wir:

$$a = \frac{u}{p} = a_{III} \frac{J_I}{\Sigma (J_v)_I} \dots \dots (176 \text{ b})$$

Aus den Gleichungen (175 b) geht hervor, dass die $(J_v)_I$ sowohl positive als negative Werte annehmen können, und zwar wird

$$(J_v)_I \gtrless 0, \text{ wenn } \lambda_v \gtrless \frac{1}{1 + f_{III}}.$$

Die negativen $(J_v)_I$ werden, wie leicht ersichtlich, positiv, wenn man f_{III} anstatt f_{III} einführt, d. h. wenn man anstatt der Ausgleichsgrössen ε_{III} und a_{III}

des Punktes I diejenigen von II , also ε_{III} und a_{III} betrachtet. Die durch

$$\lambda_v = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Punkte bilden die Grenze zwischen den beiden zu I und II gehörigen Gebieten, die, jedes für sich einer Belastungsänderung unterworfen, ε_{III} bzw. ε_{III} zu einem Maximum machen. Gleichzeitige Änderungen in beiden Gebieten heben sich zum Teil (oder auch ganz) auf, analog dem Falle der allein belasteten Speisepunkte [96], deren Ausgleich ebenfalls nur von der Differenz der Belastungsänderungen beider Stromabnahmen abhing.

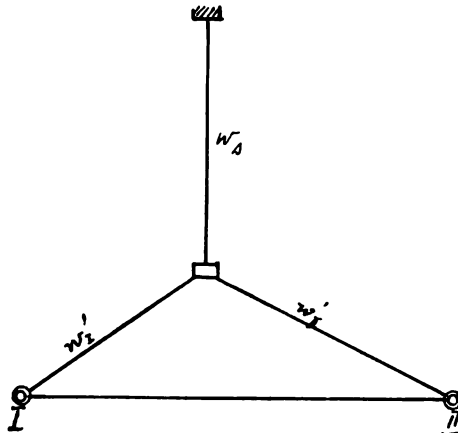


Fig. 119.

Wollen wir also den ungünstigsten Fall betrachten, so dürfen wir nur die Belastungen eines durch die Bedingung

$$\lambda = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Gebietes ändern, während alle anderen Gebiete in voller Stärke wirken.

Wie aus der Betrachtung des Falles der allein belasteten Speisepunkte folgt, tritt stets ein grösserer als der für volle Belastung berechnete Spannungsabfall in der Verteilungsleitung auf, wenn bei voll belasteten Abzweigungen sich die Belastung eines Speisepunktes allein vermindert, da ja zu dem berechneten Spannungsverlust noch der durch den Ausgleichsstrom J_{III} verursachte Spannungsabfall sich addiert. In diesem Falle ist stets der Querschnitt der Verteilungsleitung auf Ausgleich zu berechnen.

100. Sind die beiden Speiseleitungen zum Teil zu einer Sammelleitung zusammengefasst (Fig. 119), so treten in der Gleichung (XXVIII) an die Stelle der Widerstände w_I und w_{II} die kleineren Widerstände w_I' und w_{II}' und an die Stelle von $p_s \varepsilon$ der entsprechend kleinere Teilverlust $p_s' \varepsilon$. Eine solche Anordnung verbessert den Ausgleich unter sonst gleichen Netzverhältnissen wesentlich, wie man aus folgender Überlegung erkennt.

Einfluss von
Sammel-
leitungen
auf den
Ausgleich.

Gemäss seiner Entstehung kann der Widerstand w_s in zwei getrennte Leiter, w_{sI} und w_{sII} , gespalten werden, die den Bedingungen genügen:

$$g_{sI} + g_{sII} = g_s$$

$$\frac{g_{sI}}{g_{sII}} = \frac{J_I}{J_{II}}.$$

Die so entstandenen getrennten Speiseleiter haben daher die Widerstände $w_I = w_{sI} + w_I'$ und $w_{II} = w_{sII} + w_{II}'$ und der Ausgleich für diesen Fall wird a_{III} gemäss Gleichung (XXVIII). Dagegen wird für die Anordnung nach Fig. 119, falls wir

$$w_{sI} = \lambda w_I, \quad w_{sII} = \lambda w_{II},$$

also

$$w_I' = (1 - \lambda) w_I, \quad w_{II}' = (1 - \lambda) w_{II}, \quad p_s' = (1 - \lambda) p_s$$

eingeführen, der Ausgleich

$$a_{III}' = \frac{w_I' + w_{II}' + w_{III}}{w_{III}} \cdot \frac{1}{(1 - \lambda) p_s} = \left(\frac{w_I + w_{II}}{w_{III}} + \frac{1}{1 - \lambda} \right) \cdot \frac{1}{p_s},$$

so dass

$$a_{III}' - a_{III} = \frac{\lambda}{1 - \lambda} \cdot \frac{1}{p_s} > 0.$$

a_{III}' ist also stets grösser als a_{III} . Z. B. für $\lambda = 0.8$; $p_s = 0.1$; $a_{III} = 40$ wird $a_{III}' = 80$, also doppelt so gross, als wenn kein Sammelleiter vorhanden wäre.

Daher ist die Vereinigung von Speiseleitern zu Sammelleitungen zu empfehlen, besonders da auch die Gestehungs- und Verlegungskosten eines dickeren Leiters geringer sind, als die zweier dünnerer. Ein Nachteil haftet den Sammelleitungen allerdings an, nämlich dass bei einer Störung in ihm ein grösseres Netzgebiet in Mitleidenschaft gezogen wird [123].

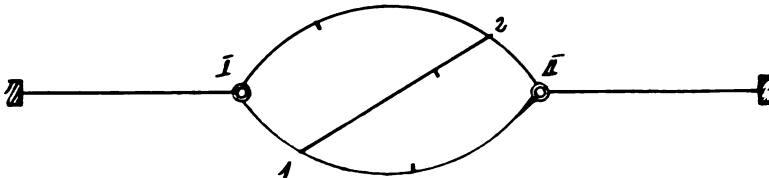


Fig. 120.

Liegen zwischen den beiden betrachteten Speisepunkten mehrere Verteilungsleiter, die ihrerseits wieder durch belastete Verteilungsleiter verbunden sind, d. h. bildet das Verteilungsnetz Maschen (Fig. 120), so können wir zwar noch immer die Ausgleichsgrösse a_{III} nach Gleichung (XXVIII) bilden, etwa indem wir die Maschen durch widerstandstreue Netzümbildung § 8 II, in einen einfachen Strang III auflösen,¹⁾ doch würde dieses Verfahren, das bei mehreren Speisepunkten für alle Kombinationen von je zwei Punkten zu wiederholen wäre, eine ausserordentliche Erschwerung der Ausgleichsrechnungen bedeuten, da, wie wir gesehen haben, die Methode der Netzümbildung langwierige und zeitraubende Rechnungen bedingt. In einzelnen einfachen Fällen wird man sich dadurch helfen können, dass man die Verbindung 12 vernachlässigt. Allgemein ist dies jedenfalls nicht angingig, da

101.
Der Ausgleich in
verzweigten
Netzen

1) Vorschlag von GALLUSSER und HAUSSMANN: Elektrische Leitungsnetze. Berlin 1904

des Punktes I diejenigen von II , also ε_{III} und a_{III} betrachtet. Die durch

$$\lambda_v = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Punkte bilden die Grenze zwischen den beiden zu I und II gehörigen Gebieten, die, jedes für sich einer Belastungsänderung unterworfen, ε_{III} bzw. ε_{III} zu einem Maximum machen. Gleichzeitige Änderungen in beiden Gebieten heben sich zum Teil (oder auch ganz) auf, analog dem Falle der allein belasteten Speisepunkte [96], deren Ausgleich ebenfalls nur von der Differenz der Belastungsänderungen beider Stromabnahmen abhing.

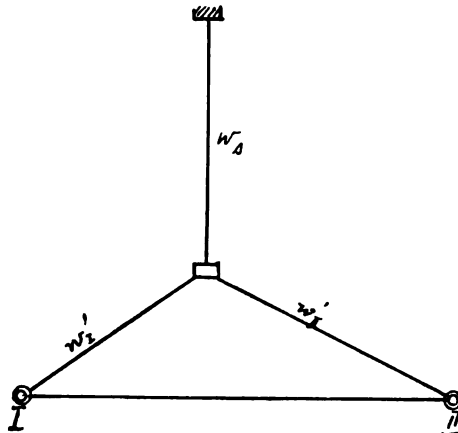


Fig. 119.

Wollen wir also den ungünstigsten Fall betrachten, so dürfen wir nur die Belastungen eines durch die Bedingung

$$\lambda = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Gebietes ändern, während alle anderen Gebiete in voller Stärke wirken.

Wie aus der Betrachtung des Falles der allein belasteten Speisepunkte folgt, tritt stets ein grösserer als der für volle Belastung berechnete Spannungsabfall in der Verteilungsleitung auf, wenn bei voll belasteten Abzweigungen sich die Belastung eines Speisepunktes allein vermindert, da ja zu dem berechneten Spannungsverlust noch der durch den Ausgleichsstrom J_{III} verursachte Spannungsabfall sich addiert. In diesem Falle ist stets der Querschnitt der Verteilungsleitung auf Ausgleich zu berechnen.

100. Sind die beiden Speiseleitungen zum Teil zu einer Sammelleitung zusammengefasst (Fig. 119), so treten in der Gleichung (XXVIII) an die Stelle der Widerstände w_I und w_{II} die kleineren Widerstände w'_I und w'_{II} und an die Stelle von $p_s \varepsilon$ der entsprechend kleinere Teilverlust $p'_s \varepsilon$. Eine solche Anordnung verbessert den Ausgleich unter sonst gleichen Netzverhältnissen wesentlich, wie man aus folgender Überlegung erkennt.

Einfluss von
Sammel-
leitungen
auf den
Ausgleich.

Gemäss seiner Entstehung kann der Widerstand w_s in zwei getrennte Leiter, w_{sI} und w_{sII} , gespalten werden, die den Bedingungen genügen:

$$g_{sI} + g_{sII} = g_s$$

$$\frac{g_{sI}}{g_{sII}} = \frac{J_I}{J_{II}}.$$

Die so entstandenen getrennten Speiseleiter haben daher die Widerstände $w_I = w_{sI} + w_I'$ und $w_{II} = w_{sII} + w_{II}'$ und der Ausgleich für diesen Fall wird a_{III} gemäss Gleichung (XXVIII). Dagegen wird für die Anordnung nach Fig. 119, falls wir

$$w_{sI} = \lambda w_I, \quad w_{sII} = \lambda w_{II},$$

also

$$w_I' = (1 - \lambda) w_I, \quad w_{II}' = (1 - \lambda) w_{II}, \quad p_s' = (1 - \lambda) p_s$$

eingeführen, der Ausgleich

$$a_{III}' = \frac{w_I' + w_{II}' + w_{III}}{w_{III}} \cdot \frac{1}{(1 - \lambda) p_s} = \left(\frac{w_I + w_{II}}{w_{III}} + \frac{1}{1 - \lambda} \right) \cdot \frac{1}{p_s},$$

so dass

$$a_{III}' - a_{III} = \frac{\lambda}{1 - \lambda} \cdot \frac{1}{p_s} > 0.$$

a_{III}' ist also stets grösser als a_{III} . Z. B. für $\lambda = 0.8$; $p_s = 0.1$; $a_{III} = 40$ wird $a_{III}' = 80$, also doppelt so gross, als wenn kein Sammelleiter vorhanden wäre.

Daher ist die Vereinigung von Speiseleitern zu Sammelleitungen zu empfehlen, besonders da auch die Gestehungs- und Verlegungskosten eines dickeren Leiters geringer sind, als die zweier dünnerer. Ein Nachteil haftet den Sammelleitungen allerdings an, nämlich dass bei einer Störung in ihm ein grösseres Netzgebiet in Mitleidenschaft gezogen wird [123].

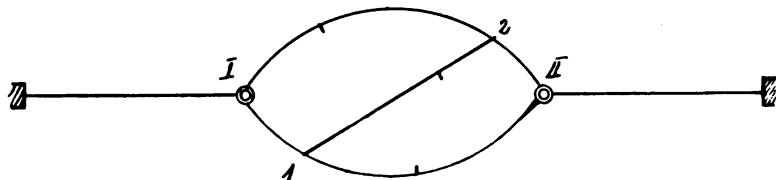


Fig. 120.

Liegen zwischen den beiden betrachteten Speisepunkten mehrere Verteilungsleiter, die ihrerseits wieder durch belastete Verteilungsleiter verbunden sind, d. h. bildet das Verteilungsnetz Maschen (Fig. 120), so können wir zwar noch immer die Ausgleichsgrösse a_{III} nach Gleichung (XXVIII) bilden, etwa indem wir die Maschen durch widerstandstreue Netzümbildung [88 ff.] in einen einfachen Strang III auflösen,¹⁾ doch würde dieses Verfahren, das bei mehreren Speisepunkten für alle Kombinationen von je zwei Punkten zu wiederholen wäre, eine ausserordentliche Erschwerung der Ausgleichsrechnungen bedeuten, da, wie wir gesehen haben, die Methode der Netzümbildung langwierige und zeitraubende Rechnungen bedingt. In einzelnen einfachen Fällen wird man sich dadurch helfen können, dass man die Verbindung 12 vernachlässigt. Allgemein ist dies jedenfalls nicht angängig, da

101.
Der Ausgleich in verzweigten Netzen.

1) Vorschlag von GALLUSSER und HAUSMANN: Elektrische Leitungsnetze. Berlin 1904.

es ja ganz von der Leitfähigkeit g_{12} und der Potentialdifferenz ε_{12} der Enden des Leiters 12 abhängt, wieviel er zum Ausgleich beiträgt.

Aber selbst wenn man q_{III} auf diesem Wege berechnet hat, so kann man doch nicht mit seiner Hilfe auf die eigentlich wichtige, das Ziel der Ausgleichsrechnungen bildende Grösse ε_{III} vermittelst der Gleichung (XXIX b) und (175 b) zurückgehen, weil diese die Grösse λ enthalten, die hier keine Bedeutung mehr hat, da ja die Einzellasten nicht unmittelbar auf die Speisepunkte, sondern nur auf die Knotenpunkte übertragen werden können, die weitere Übertragung der Knotenpunktlasten auf die Speisepunkte aber die Aufstellung und Lösung der Netzgleichungen notwendig macht. Wir beschreiten diesen Weg und werden dadurch die allgemeine Lösung des Problems des Ausgleichs von mehreren Seiten bei verzweigten Verteilungsleitungen erhalten.

Betrachten wir ein Netz mit N Speisepunkten und n Knotenpunkten, das nur in den Kreuzungspunkten belastet ist, so haben wir, wie bereits gezeigt, auch die Speisepunkte als Knotenpunkte zu behandeln, falls wir, wie stets bei Ausgleichsrechnungen, eine andere als die normale Belastung voraussetzen. Die Netzgleichungen lauten dann:

$$\left. \begin{aligned} g_{II} \varepsilon_I - g_{III} \varepsilon_{II} - \dots - g_{IN} \varepsilon_N - g_{I1} \varepsilon_1 - g_{I2} \varepsilon_2 - \dots - g_{In} \varepsilon_n &= J_I \\ - g_{III} \varepsilon_I + g_{III} \varepsilon_{II} - \dots - g_{IIN} \varepsilon_N - g_{III} \varepsilon_1 - g_{II2} \varepsilon_2 - \dots - g_{IIn} \varepsilon_n &= J_{II} \\ \dots &\dots \\ - g_{NI} \varepsilon_I - g_{NII} \varepsilon_{II} - \dots + g_{NN} \varepsilon_N - g_{N1} \varepsilon_1 - g_{N2} \varepsilon_2 - \dots - g_{Nn} \varepsilon_n &= J_N \\ - g_{1I} \varepsilon_I - g_{1II} \varepsilon_{II} - \dots - g_{1N} \varepsilon_N + g_{11} \varepsilon_1 - g_{12} \varepsilon_2 - \dots - g_{1n} \varepsilon_n &= J_1 \\ \dots &\dots \\ - g_{nI} \varepsilon_I - g_{nII} \varepsilon_{II} - \dots - g_{nN} \varepsilon_N - g_{n1} \varepsilon_1 - g_{n2} \varepsilon_2 - \dots + g_{nn} \varepsilon_n &= J_n \end{aligned} \right\} \quad (177)$$

Die Lösung schreiben wir nun in der bereits bekannten Form:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_I &= q_{II} J_I + q_{III} J_{II} + \dots + q_{IN} J_N + q_{I1} J_1 + \dots + q_{In} J_n \\ \varepsilon_{II} &= q_{III} J_I + q_{III} J_{II} + \dots + q_{IIN} J_N + q_{III} J_1 + \dots + q_{IIn} J_n \\ \dots &\dots \\ \varepsilon_N &= q_{NI} J_I + q_{NII} J_{II} + \dots + q_{NN} J_N + q_{N1} J_1 + \dots + q_{Nn} J_n \\ \varepsilon_1 &= q_{1I} J_I + q_{1II} J_{II} + \dots + q_{1N} J_N + q_{11} J_1 + \dots + q_{1n} J_n \\ \dots &\dots \\ \varepsilon_n &= q_{nI} J_I + q_{nII} J_{II} + \dots + q_{nN} J_N + q_{n1} J_1 + \dots + q_{nn} J_n \end{aligned} \right\} \quad (178)$$

worin die q_{nr} die im Abschnitt [83] definierte Bedeutung von Knotenpunktspannungsverlusten besitzen. Sie können nach der VERHOECKXschen Methode oder vermittelst des GAUSSschen Näherungsverfahrens [82] berechnet werden, indem man jeweilig nur einen Knotenpunkt mit der Stromeinheit belastet. Wie wir aber aus den zu entwickelnden Formeln noch sehen werden, kommen für die Ausgleichsrechnungen nur die von den Speisepunkten abhängigen Grössen q_{NI} bzw. q_{Nn} in Frage, es brauchen für unseren Zweck also auch nur diese berechnet zu werden. Dies sichert aber dem GAUSSschen Verfahren sowohl in bezug auf Kürze als Bequemlichkeit der Rechnungen

unbedingt den Vorzug, denn es sind verhältnismässig wenige Gleichungssysteme zu lösen, nämlich nur so viele, als Speisepunkte vorhanden sind. Von dem VERHOECKXschen Verfahren dagegen wissen wir, dass die endgültigen ϱ -Werte erst nach Einführung sämtlicher Knotenpunkte erhalten werden, es wären also alle ϱ -Werte zu ermitteln.

Für die normale (volle) Netzbelastung ist

$$\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \dots = \varepsilon_N = \varepsilon_s,$$

also wird

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{III} = \varepsilon_{II} - \varepsilon_I &= (\varrho_{III} - \varrho_{II}) J_I + (\varrho_{III} - \varrho_{II}) J_{II} + \dots \\ &+ (\varrho_{IIv} - \varrho_{Iv}) J_v + \dots = 0 \end{aligned} \right\} \quad (179)$$

und allgemein

$$\begin{aligned} \varepsilon_{NM} &= (\varrho_{MI} - \varrho_{NI}) J_I + (\varrho_{MI} - \varrho_{NI}) J_{II} + \dots \\ &+ (\varrho_{Mv} - \varrho_{Nv}) J_v + \dots = 0. \end{aligned}$$

Nehmen wir nun an, dass zunächst nur die Belastung eines Punktes, etwa J_I , um $u_I J_I = (1 - \eta_I) J_I$ vermindert wird, so erhalten wir für die neue Spannungsverteilung ein Gleichungssystem, das sich von (178) nur dadurch unterscheidet, dass $\eta_I J_I$ an die Stelle von J_I tritt. Daher wird nunmehr:

$$\varepsilon_{III} = (\varrho_{III} - \varrho_{II}) \eta_I J_I + (\varrho_{III} - \varrho_{II}) J_{II} + \dots + (\varrho_{IIv} - \varrho_{Iv}) J_v + \dots$$

und durch Subtraktion der Gleichung (179) von dieser Gleichung:

$$\varepsilon_{III} = -(\varrho_{III} - \varrho_{II}) (1 - \eta_I) J_I = (\varrho_{II} - \varrho_{III}) u_I J_I.$$

Allgemein ist also der Potentialunterschied von I gegen einen anderen Speisepunkt N :

$$\varepsilon_{IN} = (\varrho_{II} - \varrho_{NI}) u_I J_I \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (180)$$

Man kann sich ε_{IN} auch dadurch entstanden denken, dass der Knotenpunkt I , anstatt um $u_I J_I$ entlastet zu werden, mit der negativen Grösse $-u_I J_I$ belastet wird, während im übrigen alle der Vollbelastung des Netzes entsprechenden Stromabnahmen, also auch J_I , wirken. Dann überlagert sich der normalen Spannungsverteilung eine solche, die der Belastung $-u_I J_I$ entspricht, nämlich im Punkte N ein Spannungsverlust $-\varrho_{NI} u_I J_I$ und in I ein Spannungsverlust $-\varrho_{II} u_I J_I$. Die thatsächlichen Spannungsverluste bei N und I sind also:

$$\varepsilon_N = \varepsilon_s - \varrho_{NI} u_I J_I$$

$$\varepsilon_I = \varepsilon_s - \varrho_{II} u_I J_I,$$

mithin wie vorher:

$$\varepsilon_{IN} = (\varrho_{II} - \varrho_{NI}) u_I J_I.$$

Denken wir uns nun den Speisepunkt I vom übrigen Netz getrennt (etwa durch Schneiden der Verteilungskabel rings um I), so würde der der Belastungsverminderung entsprechende Strom $\Delta J_I = u_I J_I$ von I nach Z

fließend wieder eine Spannungserhöhung von I gegenüber allen anderen unverändert gebliebenen Speisepunkten hervorrufen:

$$\bar{\varepsilon}_{IN} = A J_I w_I = u_I \frac{J_I}{J_{0I}} \varepsilon_s, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (181)$$

die infolge der Verteilungs- bzw. Ausgleichsleitungen einen Ausgleichsstrom hervorruft, der die Potentialdifferenz $\bar{\varepsilon}_{IN}$ auf den thatsächlich vorhandenen Unterschied ε_{IN} herabdrückt. Es wird also:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{IN}}{\varepsilon_{IN}} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} p_s = a_{IN} p_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (182)$$

und

$$a_{IN} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (168c)$$

Setzen wir hierin für p_{IN} seinen Wert, nämlich

$$p_{IN} = \frac{\varepsilon_{IN}}{\varepsilon} = (q_{II} - q_{NI}) u_I J_I \frac{p_s}{\varepsilon},$$

so folgt

$$a_{IN} = \frac{1}{q_{II} - q_{NI}} \cdot \frac{\varepsilon_s}{p_s J_{0I}}.$$

Nun ist

$$\varepsilon_s = w_I J_{0I},$$

also tritt an die Stelle der bei einfacher Strecke *III* geltenden Gleichung (XXVIII) die folgende Gleichung, wenn wir zugleich allgemein die Belastungsänderung $u_n J_n$ des n^{ten} Knotenpunktes in bezug auf den N^{ten} und M^{ten} Speisepunkt einführen:

$$a_{NM} = \frac{w_N}{q_{NM} - q_{MN}} \cdot \frac{1}{p_s} \quad (n = N, 1, 2 \dots) \quad . \quad . \quad (XXVIIIc)$$

Diese Gleichung geht in (XXVIII) über, wenn für

$$q_{NM} = q_{II} \quad \text{und} \quad q_{MN} = q_{III}$$

die entsprechenden Werte eingesetzt werden. Es ist nämlich gemäss Fig. 115 (Seite 161):

$$q_{II} = \frac{g_{III}}{g_{II} g_{III} - g_{IN}^2}; \quad q_{III} = \frac{g_{II}}{g_{II} g_{III} - g_{IN}^2},$$

also:

$$q_{II} - q_{III} = \frac{g_{III} - g_{II}}{g_{II} g_{III} - g_{IN}^2}.$$

Nun ist

$$g_{III} - g_{II} = g_{II} \quad \text{und} \quad g_{II} g_{III} - g_{IN}^2 = g_I g_{II} + g_{II} (g_I + g_{II}).$$

Setzt man an Stelle der Leitfähigkeiten die Widerstände, so folgt nach einigen einfachen Umformungen:

$$a_{III} = \frac{w_I + \frac{w_{II}}{w_{III}} + \frac{w_{III}}{w_{III}}}{p_s} \cdot \frac{1}{p_s}.$$

An die Stelle der Gleichung (XXIX) ferner treten hier die folgenden:

$$\left. \begin{aligned} p_{NM} &= \frac{u_n}{a_{NM}} \cdot \frac{J_n}{J_{0N}} = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \frac{p_s}{\varepsilon_s} \\ \varepsilon_{NM} &= p_{NM} \varepsilon = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \\ (n &= N, 1, 2 \dots) \end{aligned} \right\} \quad \text{(XXIX c)}$$

Was nun die Gleichungen (XXX) und (XXXI) betrifft, die wir für den einfachen Strang zur Querschnittsberechnung auf Ausgleich aufgestellt haben, so müssen wir hier wieder die beiden Fälle der Projektierung und der Betriebskontrolle unterscheiden. Bei der Projektierung eines Netzes hat die Ausgleichsrechnung den Zweck, festzustellen, ob die auf Verteilung berechneten Querschnitte für den Ausgleich genügen. Stellt es sich heraus, dass dies nicht der Fall ist, so wird man natürlich nicht — abgesehen von Ausnahmefällen — unbelastete Ausgleichsleiter zwischen den einzelnen Speisepunkten verlegen, sondern die vorhandenen Verteilungsleiter verstärken, da dies billiger und für etwaige spätere Erhöhung der Stromentnahmen vorteilhafter ist. Es hat daher keinen Sinn, einen Querschnitt q_{NM} oder die entsprechende Leitfähigkeit g_{NM} zu berechnen, da ja nicht einfache Verbindungen, sondern Maschen zwischen den Speisepunkten liegen.

Dass in diesem Falle ε_{NM} am wirksamsten verkleinert wird, wenn diejenigen Leitfähigkeiten sämtlich oder teilweise vergrößert werden, die in dem der Belastungsänderung unterworfenen Punkte, hier also in N zusammenlaufen, lässt sich zwar ohne weiteres einsehen, kann aber auch auf folgendem Wege gezeigt werden. Geben wir der Übersichtlichkeit wegen N und M wieder die Werte I und II , so folgt, dass

$$\varepsilon_{II} = (\varrho_{II} - \varrho_{III}) u_I J_I$$

kleiner wird, entweder durch Vergrößerung von ϱ_{III} oder durch Verkleinerung von ϱ_{II} oder durch beides. Nun ist [83]:

$$\varrho_{II} = \frac{D_{II}}{D}; \quad \varrho_{III} = \frac{D_{III}}{D},$$

d. h.

$$\left. \begin{aligned} \varrho_{II} &= \frac{1}{D} [g_{IIII} D'_{IIII} - g_{IIII} D'_{IIII} - \dots - g_{II1} D'_{II1} - g_{II2} D'_{II2} - \dots] \\ \varrho_{III} &= \frac{1}{D} [g_{IIII} D'_{IIII} + g_{IIII} D'_{IIII} + \dots + g_{II1} D'_{II1} + g_{II2} D'_{II2} + \dots] \end{aligned} \right\} \quad (183)$$

worin $D'_{\mu\nu}$ die Unterdeterminanten der Unterdeterminante D_{II} bezeichnen. Die Richtigkeit dieser Gleichungen erkennt man leicht, wenn man die Unterdeterminanten D_{II} und D_{III} nach $g_{II\nu}$ bzw. $g_{I\nu}$ entwickelt. Nun enthalten die Grössen $D'_{\mu\nu}$ überhaupt nicht die Leitfähigkeiten $g_{I\nu}$, also wird ϱ_{II} durch Vergrößerung der $g_{I\nu}$ verkleinert, da ja die Determinante D dadurch vergrößert wird. Zugleich aber wird ϱ_{III} vergrößert, da das $g_{I\nu}$ jedes einzelnen Gliedes verhältnismässig schneller wächst als D , also $\frac{g_{I\nu}}{D}$ mit $g_{I\nu}$ grösser wird.

Man wird also, falls eine Querschnittsvergrößerung der Leiter eines Speisepunktes nötig ist, für einen oder mehrere der von diesem Speisepunkt ausgehenden Verteilungsleiter — der Speiseleiter kommt im allgemeinen

fließend wieder eine Spannungserhöhung von I gegenüber allen anderen unverändert gebliebenen Speisepunkten hervorrufen:

$$\bar{\varepsilon}_{IN} = \Delta J_I w_I = u_I \frac{J_I}{J_{0I}} \varepsilon_s, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (181)$$

die infolge der Verteilungs- bzw. Ausgleichsleitungen einen Ausgleichsstrom hervorruft, der die Potentialdifferenz $\bar{\varepsilon}_{IN}$ auf den thatsächlich vorhandenen Unterschied ε_{IN} herabdrückt. Es wird also:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{IN}}{\varepsilon_{IN}} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} p_s = a_{IN} p_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (182)$$

und

$$a_{IN} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (182c)$$

Setzen wir hierin für p_{IN} seinen Wert, nämlich

$$p_{IN} = \frac{\varepsilon_{IN}}{\varepsilon} = (q_{II} - q_{NI}) u_I \frac{J_I}{\varepsilon},$$

so folgt

$$a_{IN} = \frac{1}{q_{II} - q_{NI}} \cdot \frac{\varepsilon_s}{p_s J_{0I}}.$$

Nun ist

$$\varepsilon_s = w_I J_{0I},$$

also tritt an die Stelle der bei einfacher Strecke *III* geltenden Gleichung (XXVIII) die folgende Gleichung, wenn wir zugleich allgemein die Belastungsänderung $u_n J_n$ des n^{ten} Knotenpunktes in bezug auf den N^{ten} und M^{ten} Speisepunkt einführen:

$$a_{NM} = \frac{w_N}{q_{NM} - q_{MN}} \cdot \frac{1}{p_s} \quad (n = N, 1, 2 \dots) \quad . \quad . \quad (XXVIIIc)$$

Diese Gleichung geht in (XXVIII) über, wenn für

$$q_{NM} = q_{II} \quad \text{und} \quad q_{MN} = q_{III}$$

die entsprechenden Werte eingesetzt werden. Es ist nämlich gemäss Fig. 115 (Seite 161):

$$q_{II} = \frac{g_{III}}{g_{II} g_{III} - g_{III}^2}; \quad q_{III} = \frac{g_{III}}{g_{II} g_{III} - g_{III}^2},$$

also:

$$q_{II} - q_{III} = \frac{g_{III} - g_{III}}{g_{II} g_{III} - g_{III}^2}.$$

Nun ist

$$g_{III} - g_{III} = g_{II} \quad \text{und} \quad g_{II} g_{III} - g_{III}^2 = g_I g_{II} + g_{III} (g_I + g_{II}).$$

Setzt man an Stelle der Leitfähigkeiten die Widerstände, so folgt nach einigen einfachen Umformungen:

$$a_{III} = \frac{w_I + w_{II} + w_{III}}{w_{III}} \cdot \frac{1}{p_s}.$$

An die Stelle der Gleichung (XXIX) ferner treten hier die folgenden:

$$\left. \begin{aligned} p_{NM} &= \frac{u_n}{a_{NM}} \cdot \frac{J_n}{J_{0N}} = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \frac{p_n}{\varepsilon_n} \\ \varepsilon_{NM} &= p_{NM} \varepsilon = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \\ (n &= N, 1, 2 \dots) \end{aligned} \right\} \quad (\text{XXIX c})$$

Was nun die Gleichungen (XXX) und (XXXI) betrifft, die wir für den einfachen Strang zur Querschnittsberechnung auf Ausgleich aufgestellt haben, so müssen wir hier wieder die beiden Fälle der Projektierung und der Betriebskontrolle unterscheiden. Bei der Projektierung eines Netzes hat die Ausgleichsrechnung den Zweck, festzustellen, ob die auf Verteilung berechneten Querschnitte für den Ausgleich genügen. Stellt es sich heraus, dass dies nicht der Fall ist, so wird man natürlich nicht — abgesehen von Ausnahmefällen — unbelastete Ausgleichsleiter zwischen den einzelnen Speisepunkten verlegen, sondern die vorhandenen Verteilungsleiter verstärken, da dies billiger und für etwaige spätere Erhöhung der Stromentnahmen vorteilhafter ist. Es hat daher keinen Sinn, einen Querschnitt q_{NM} oder die entsprechende Leitfähigkeit g_{NM} zu berechnen, da ja nicht einfache Verbindungen, sondern Maschen zwischen den Speisepunkten liegen.

Dass in diesem Falle ε_{NM} am wirksamsten verkleinert wird, wenn diejenigen Leitfähigkeiten sämtlich oder teilweise vergrößert werden, die in dem der Belastungsänderung unterworfenen Punkte, hier also in N zusammenlaufen, lässt sich zwar ohne weiteres einsehen, kann aber auch auf folgendem Wege gezeigt werden. Geben wir der Übersichtlichkeit wegen N und M wieder die Werte I und II , so folgt, dass

$$\varepsilon_{II} = (\varrho_{II} - \varrho_{III}) u_I J_I$$

kleiner wird, entweder durch Vergrößerung von ϱ_{III} oder durch Verkleinerung von ϱ_{II} oder durch beides. Nun ist [83]:

$$\varrho_{II} = \frac{D_{II}}{D}; \quad \varrho_{III} = \frac{D_{III}}{D},$$

d. h.

$$\left. \begin{aligned} \varrho_{II} &= \frac{1}{D} [g_{IIII} D'_{IIII} - g_{IIII} D'_{IIII} - \dots - g_{II1} D'_{II1} - g_{II2} D'_{II2} - \dots] \\ \varrho_{III} &= \frac{1}{D} [g_{IIII} D'_{IIII} + g_{IIII} D'_{IIII} + \dots + g_{II1} D'_{II1} + g_{II2} D'_{II2} + \dots] \end{aligned} \right\} \quad (183)$$

worin $D'_{\mu\nu}$ die Unterdeterminanten der Unterdeterminante D_{II} bezeichnen. Die Richtigkeit dieser Gleichungen erkennt man leicht, wenn man die Unterdeterminanten D_{II} und D_{III} nach $g_{II\nu}$ bzw. $g_{I\nu}$ entwickelt. Nun enthalten die Grössen $D'_{\mu\nu}$ überhaupt nicht die Leitfähigkeiten $g_{I\nu}$, also wird ϱ_{II} durch Vergrößerung der $g_{I\nu}$ verkleinert, da ja die Determinante D dadurch vergrößert wird. Zugleich aber wird ϱ_{III} vergrößert, da das $g_{I\nu}$ jedes einzelnen Gliedes verhältnismässig schneller wächst als D , also $\frac{g'_{I\nu}}{D}$ mit $g_{I\nu}$ grösser wird.

Man wird also, falls eine Querschnittsvergrößerung der Leiter eines Speisepunktes nötig ist, für einen oder mehrere der von diesem Speisepunkt ausgehenden Verteilungsleiter — der Speiseleiter kommt im allgemeinen

nicht in Frage, weil ja zugleich mit dem seinen der Querschnitt aller anderen Speiseleiter vergrößert werden müsste — den nächstgrößeren Normalquerschnitt wählen und durch nochmalige Berechnung der Grössen q kontrollieren, ob der Spannungsunterschied auf die zulässige Grösse herabgegangen ist.

Anders liegen dagegen die Verhältnisse, wenn bei fertig verlegten, in Betrieb befindlichen Netzen Ausgleichsberechnungen oder unmittelbare Messungen einen unzulässig hohen Potentialunterschied ε_{III} bzw. eine zu geringe Ausgleichsgrösse a_{III} ergeben. Dann wird in der Regel eine unmittelbare Verbindung der beiden Speisepunkte durch einen Ausgleichsleiter hergestellt, dessen Querschnitt wir nunmehr berechnen wollen.

Der vorhandene Ausgleich sei nach (XXVIIIc) zu a_{III} berechnet; er soll durch Verlegung einer Ausgleichsleitung von der Leitfähigkeit g'_{III} auf die Grösse a'_{III} , bzw. ε_{III} auf den Wert ε'_{III} gebracht werden.

Durch Verlegung der Leitfähigkeit g'_{III} werden in der Determinante D des Gleichungssystems die drei Grössen g_{II} , g_{IH} und g_{III} geändert und wir erhalten als neue Determinante

$$D' = \begin{vmatrix} (g_{II} + g'_{III}) - (g_{IH} + g'_{III}) - g_{III} & \cdots \\ -(g_{HI} + g'_{III}) & (g_{HH} + g'_{III}) - g_{HHI} & \cdots \\ -g_{HII} & -g_{HHI} & g_{HHH} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix}$$

$$= D + \begin{vmatrix} g'_{III} - g_{III} - g_{III} & \cdots \\ -g'_{III} & g_{HH} - g_{HHI} & \cdots \\ 0 & -g_{HHI} & g_{HHH} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} g_{II} - g'_{III} - g_{III} & \cdots \\ -g_{HI} & g'_{III} - g_{HHI} & \cdots \\ -g_{HII} & 0 & g_{HHH} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix}$$

$$+ \begin{vmatrix} g'_{III} - g'_{III} - g_{III} & \cdots \\ -g'_{III} & g'_{III} - g_{HHI} & \cdots \\ 0 & 0 & g_{HHH} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix}$$

oder, da die letzte Determinante wegen der Gleichheit der ersten und zweiten Säule Null ergibt:

$$D' = D + g'_{III} D_{II} - g'_{III} D_{IH} - g'_{III} D_{IH} + g'_{III} D_{HH},$$

d. h.

$$\frac{D'}{D} = 1 + g'_{III} (q_{II} - 2q_{IH} + q_{HH}) \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (184)$$

Ferner wird infolge der gleichen Entwicklung, aus der die Gleichungen (183) entstanden sind:

$$e'_{II} = \frac{1}{D'} [(g_{HH} + g'_{III}) D'_{HH} - g_{HHI} D'_{HHI} - \cdots]$$

$$e'_{HI} = \frac{1}{D'} [(g_{IH} + g'_{III}) D'_{HH} + g_{IHH} D'_{HHI} + \cdots],$$

da ja die Grössen $D'_{\mu\nu}$ von der Grösse g'_{III} unabhängig sind. Daher wird:

$$e'_{II} - e'_{HI} = \frac{1}{D'} [(g_{HH} - g_{IH}) D'_{HH} - (g_{HHI} + g_{IHH}) D'_{HHI} - \cdots],$$

während aus den Gleichungen (183) folgt:

$$q_{II} - q_{III} = \frac{1}{D} [(g_{III} - g_{II}) D'_{III} - (g_{III} + g_{II}) D'_{III} - \dots],$$

also erhalten wir unter Berücksichtigung der Gleichung (XXIX c):

$$\frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon'_{III}} = \frac{q_{II} - q_{III}}{q'_{II} - q'_{III}} = \frac{D'}{D} = 1 + g'_{III} (q_{II} - 2q_{III} + q_{III}).$$

Andererseits ergibt die Gleichung (XXVIII c):

$$\frac{q_{II} - q_{III}}{q'_{II} - q'_{III}} = \frac{a'_{III}}{a_{III}},$$

also folgt:

$$g'_{III} = \frac{\Delta \varepsilon_{III}}{\varepsilon'_{III}} \cdot \frac{1}{q_{II} - 2q_{III} + q_{III}} = \frac{\Delta a_{III}}{a_{III}} \cdot \frac{1}{q_{II} - 2q_{III} + q_{III}} \quad (\text{XXXI c})$$

wenn

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{III} &= \varepsilon_{III} - \varepsilon'_{III} \\ \Delta a_{III} &= a'_{III} - a_{III} \end{aligned}$$

gesetzt wird. Die Gleichung (XXXI c) können wir nach Elimination von a_{III} mittels Gleichung (XXVIII c) in Übereinstimmung mit (XXXI) auch in der folgenden Form schreiben:

$$g'_{III} = \frac{\Delta a_{III} p_s}{w_i} \cdot \frac{q_{II} - q_{III}}{q_{II} - 2q_{III} + q_{III}} \quad \dots \quad (\text{XXXI}' c)$$

Für den Sonderfall der Fig. 115 (S. 161) geht diese Gleichung wieder in die Gleichung (XXXI) über, da

$$q_{II} = \frac{g_{II} + g_{III}}{D}; \quad q_{III} = \frac{g_{II}}{D}; \quad q_{III} = \frac{g_I + g_{II}}{D},$$

also

$$g'_{III} = \frac{\Delta a_{III} p_s}{w_i} \cdot \frac{g_{II}}{g_I + g_{II}} = \frac{\Delta a_{III} p_s}{w_i + w_{II}}.$$

Nehmen an der Belastungsänderung ausser dem Speisepunkte I mehrere Knotenpunkte n teil, so tritt an die Stelle der Gleichung (180) die folgende Gleichung:

$$\varepsilon_{IN} = (q_{II} - q_{NI}) u_I J_I + (q_{II} - q_{N1}) u_1 J_1 + \dots + (q_{In} - q_{Nn}) u_n J_n + \dots \quad (185)$$

103.
Änderung
mehrerer
Knoten-
punkts-
belastungen.

Für die Grösse q_{NX} folgt aus ihrer Bedeutung als Spannungsverlust in dem allein belasteten Speisepunkt N ohne weiteres, dass sie grösser ist als jedes andere q_{NM} . Dagegen hängt es ganz von der Lage der Knotenpunkte ab, ob einer der Spannungsverluste q_{NX} grösser oder kleiner ist als ein anderer q_{Mn} . Daher würden einige der Glieder der Gleichung (185) positiv, andere negativ werden, wenn alle Knotenpunkte für die Belastungsänderung in Betracht gezogen würden. Ein Maximum wird ε_{IN} natürlich für die Summe aller positiven q -Differenzen, und diese definieren daher den Bezirk von I ,

der bei der Ausgleichsrechnung für gleichzeitige Änderungen zu berücksichtigen ist. Für diesen Bezirk geht dann die Gleichung (181) über in

$$\bar{\varepsilon}_{IN} = \sum u_n \frac{J_n}{J_{0I}} \varepsilon_n \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (186)$$

und die Gleichungen (XXVIII c) und (XXIX c) erhalten die Form:

$$a_{NM} = \frac{w_N \sum u_n J_n}{\sum (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n} \cdot \frac{1}{p_n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XXVIII d)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{NM} &= \frac{\sum u_n J_n}{a_{NM} J_{0N}} = \sum (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \cdot \frac{p_n}{t_n} \\ \varepsilon_{NM} &= p_{NM} \varepsilon = \sum (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \end{aligned} \right\} \quad . \quad (XXIX d)$$

wo

$$n = N, 1, 2 \dots \text{ und } \varrho_{Nn} > \varrho_{Mn}.$$

Die Gleichungen (XXXI c) und (XXXI' c) bleiben auch hier bestehen, da sie bis auf die durch die letzten beiden Gleichungen definierten Grössen a_{NM} und ε_{NM} von der Belastungsänderung der übrigen Punkte nicht beeinflusst werden. Ihre allgemeine Form lautet:

$$g'_{NM} = \frac{J \varepsilon_{NM}}{\varepsilon'_{NM}} \cdot \frac{1}{\varrho_{NN} - 2\varrho_{NM} + \varrho_{MM}} = \frac{J a_{NM}}{a_{NM}} \cdot \frac{1}{\varrho_{NN} - 2\varrho_{NM} + \varrho_{MM}} \quad (XXXId)$$

$$g'_{NM} = \frac{J a_{NM} p_n}{w_N} \cdot \frac{\varrho_{NN} - \varrho_{MN}}{\varrho_{NN} - 2\varrho_{NM} + \varrho_{MM}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XXXId')$$

wobei

$$J \varepsilon_{NM} = \varepsilon_{NM} - \varepsilon'_{NM}$$

$$J a_{NM} = a'_{NM} - a_{NM}.$$

104.
Änderung
einer
Belastung
zwischen
zwei
Knoten-
punkten.

Soll der Einfluss der Belastungsänderung $u_v i_v$ für eine Stromabnahme i_v untersucht werden, die zwischen den beiden Knotenpunkten n und m liegt — einer derselben kann auch ein Speisepunkt sein —, so können die folgenden beiden Fälle eintreten: Beide Knotenpunkte liegen innerhalb eines der durch die positiven ϱ -Differenzen [103] definierten Speisepunktsbezirke, sagen wir innerhalb des Bezirkes I , oder sie liegen in verschiedenen Bezirken I und II .

Im ersten Falle wird, wenn wir das Verhältnis $\frac{l_{nv}}{l_{nm}}$ (Fig. 121) mit λ_{nm} bezeichnen:

$$u_n J_n = (1 - \lambda_{nm}) u_v i_v$$

$$u_m J_m = \lambda_{nm} u_v i_v.$$

Also wird aus Gleichung (XXIX d):

$$\varepsilon_{III} = [(\varrho_{In} - \varrho_{In}) (1 - \lambda_{nm}) + (\varrho_{Im} - \varrho_{Im}) \lambda_{nm}] u_v i_v, \quad (187)$$

worin

$$\varrho_{In} > \varrho_{In} \quad \text{und} \quad \varrho_{Im} > \varrho_{Im}.$$

Setzen wir entsprechend der früheren, bei dem einfachen Verteilungsleiter III benutzten Bezeichnung [97]:

$$\frac{\varrho'_{nm} - \varrho_{nm}}{\varrho'_{nn} - \varrho_{nn}} = f_{nm},$$

Wird

$$\lambda_{nm} = \frac{1}{1 + f_{mn}},$$

so übt die Änderung der Stromabnahme überhaupt keinen Einfluss auf ε_{III} aus, da sich jetzt aus der Gleichung (189) stets

$$u_n (i_v)_n = 0$$

und folglich

$$\varepsilon_{III} = 0$$

ergibt. Wir können also die im vorigen Abschnitt definierten Bezirke der einzelnen Speisepunkte erweitern, indem wir ihre Grenzen durch diejenigen Punkte der zu zwei benachbarten Bezirken gehörenden Verteilungsleiter gehen lassen, für welche

$$\lambda_{nm} = \frac{1}{1 + f_{mn}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (191)$$

ist. Jede innerhalb dieser Bezirke liegende Belastungsänderung wirkt nur auf den Speisepunkt des betreffenden Bezirks, und zwar mit demjenigen im Knotenpunkt n wirkenden Betrage $u_n (i_v)_n$, der durch die Gleichungen (189) und (188) definiert ist. Für die Ausgleichsgrößen gelten die Gleichungen (XXVIII c) bis (XXXI c).

105.
Änderung
beliebiger
Belastungen.

Sind schliesslich beliebig viele Belastungsänderungen $u_v i_v$ eines Bezirks zugleich wirksam, so erhält die Gleichung (187) die Form:

$$\varepsilon_{III} = \sum [(q_{In} - q_{II n}) (1 - \lambda_{nm}) + (q_{Im} - q_{II m}) \lambda_{nm}] u_v i_v \quad (192)$$

und zwar sind hierin sowohl die v als auch die n und m Veränderliche, von denen die v alle innerhalb des Bezirks I (allgemein N) vorkommenden, die n und m auch in den angrenzenden Bezirken liegende Werte annehmen können, wobei n und m die benachbarten Knotenpunkte der in Frage kommenden Belastung i_v bedeuten. Die Gleichung (188) bleibt bestehen und an die Stelle der Gleichung (189) tritt die folgende:

$$u_n J_n = \sum u_v i_v [1 - \lambda_{nm} (1 + f_{mn})] = \sum u_v (i_v)_n \cdot \cdot \cdot \quad (193)$$

f_{mn} wird negativ, wenn beide Knotenpunkte innerhalb, positiv, wenn einer derselben ausserhalb des untersuchten Bezirks liegt. Für alle i_v aber ist die wirksame auf den Knotenpunkt n übertragene Belastungsänderung $u_n (i_v)_n$ positiv.

Wie wir also bei der Netzberechnung „auf Verteilung“ die Einzellasten äquipotentiell auf die Knotenpunkte verlegen und dadurch ein nur in den letzteren belastetes Netz erhalten, für welches uns die Netzgleichungen die Spannungs- und Stromverteilung liefern, so müssen wir bei der Netzberechnung „auf Ausgleich“ die Belastungsänderungen als „wirksame Belastungsänderungen“ auf die entsprechenden Knotenpunkte nach Gleichung (189) übertragen und erhalten so ein Netz, in dem nur gewisse Knotenpunkte eines Bezirks Belastungsänderungen unterliegen. Für dieses aber gelten die in dem Abschnitt [103] entwickelten Gleichungen (XXVIII d) bis (XXXI d), die

Die Grösse $\sum u_n J_n$, also die gesamte wirksame Belastungsänderung, lässt sich — wenigstens angenähert — stets dann bestimmen, wenn hervorragende Einzellasten (Theater, grosse Motoren u. dgl.) gegeben sind, die ja auch die Spannungsschwankungen am stärksten beeinflussen. Sind keine derartige Einzellasten vorhanden, so muss man die Grösse u den Umständen angemessen annehmen, und zwar wird u um so grösser bemessen werden müssen, je gleichmässiger der Wechsel der Stromabnahme nach Zeit und Ort erfolgt, je mehr also die Verbraucher eines Bezirks der gleichen Kategorie (Läden und Geschäftshäuser, Cafés, Wohnungen), die anderer Bezirke jedoch anderen Kategorien angehören, dagegen um so kleiner, je mehr alle Kategorien in den verschiedenen Bezirken gleichmässig verteilt sind, da in diesem Falle

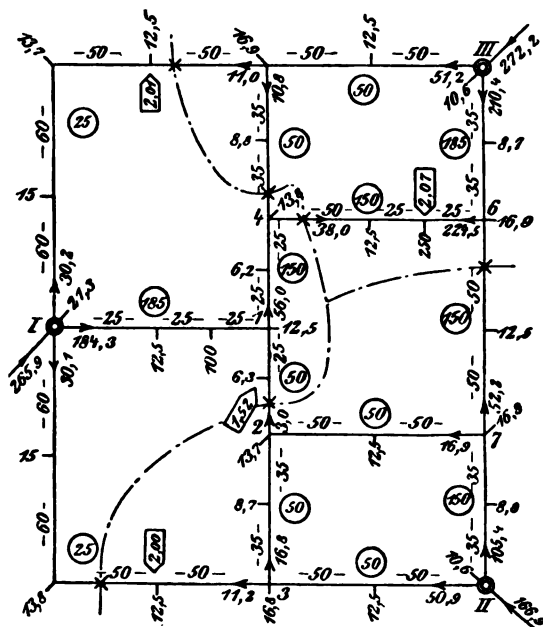


Fig. 122.

die Schwankungen durch den Wechsel der Verbraucher leichter ausgeglichen werden. Eine Bemessung von u zwischen 0·20 und 0·40 dürfte allen Anforderungen genügen, und zwar sind für grosse Netze die kleineren Werte und umgekehrt zu wählen.

Für diese Grenzen von ϵ_{NM} und u sind durch die Gleichungen (XXIX) bis (XXIX d) auch die Grenzen von a_{NM} festgelegt. a_{NM} wird etwa zwischen 20 und 40 anzusetzen sein; bei grossen Netzen sind die der unteren, bei kleineren Netzen die der oberen Grenze näher liegenden Werte zu fordern.

Beispiel.

Als Beispiel soll das in Fig. 122 gezeichnete Netz mit drei Speise- und sieben Knotenpunkten auf Ausgleich kontrolliert werden. Es ist für eine Netzspannung von 220 Volt bei 2% Netzverlust und 10% Speisekabelverlust, also für $\epsilon = 110$, $\epsilon_{max} = 2\cdot2$ und $\epsilon_s = 11$ Volt berechnet. Die Belastungen sind insofern ungünstig angenommen, als bei einer verhältnismässig geringen Allgemeinbelastung — nur 0·25 Amp. oder 1 Lampe von 16 HK für den laufenden Meter Strassenlänge — zwei starke Einzellasten von 250 und 100 Amp.

$\varrho_{II} = 0.0216$					Knoten gehört zu Speisepunkt
$\varrho_{III} = 0.0121$	$\varrho_{III} = 0.0246$				
$\varrho_{III} = 0.0119$	$\varrho_{III} = 0.0135$	$\varrho_{III} = 0.0206$			
$\varrho_{I1} = 0.0178$	$\varrho_{II1} = 0.0144$	$\varrho_{III1} = 0.0142$	1		I
$\varrho_{I2} = 0.0157$	$\varrho_{II2} = 0.0175$	$\varrho_{III2} = 0.0142$	2		II
$\varrho_{I3} = 0.0148$	$\varrho_{II3} = 0.0197$	$\varrho_{III3} = 0.0136$	3		II
$\varrho_{I4} = 0.0161$	$\varrho_{II4} = 0.0147$	$\varrho_{III4} = 0.0157$	4		I
$\varrho_{I5} = 0.0150$	$\varrho_{II5} = 0.0140$	$\varrho_{III5} = 0.0173$	5		III
$\varrho_{I6} = 0.0133$	$\varrho_{II6} = 0.0157$	$\varrho_{III6} = 0.0178$	6		III
$\varrho_{I7} = 0.0130$	$\varrho_{II7} = 0.0205$	$\varrho_{III7} = 0.0151$	7		II

durch die sofort die erste gröbere Teilung des Netzes in Ausgleichsbezirke ermöglicht wird, da jeder Knotenpunkt zu demjenigen Bezirk gehört, dessen ϱ den grössten Wert besitzt; die ϱ -Differenzen [103] sollen ja für jeden Bezirk positiv sein. Die Zugehörigkeit der einzelnen Knotenpunkte zu den Speisepunktsbezirken ist neben den ϱ -Werten angegeben; in Fig. 123 sind die einzelnen Bezirke durch strichpunktierte Linien abgegrenzt. Die zu zwei Bezirken gehörenden Verteilungsleiter sind nun gemäss Gleichung (191) und (188) zu teilen. Es wird für Strecke

$$I\ 3: \quad \varrho_{II3} = 0.0197 \quad \varrho_{II} = 0.0216 \quad f_{3I} = \frac{49}{95} = 0.52; \quad \lambda_{I3} = \frac{1}{1.52}; \\ - \varrho_{I3} = \frac{148}{0.0049} \quad - \varrho_{III} = \frac{121}{0.0095} \quad \lambda_{I3} l_{I3} = 145 \text{ m.}$$

$$I\ 2: \quad \varrho_{I2} = 0.0175 \quad \varrho_{I1} = 0.0178 \quad f_{21} = 0.53; \quad \lambda_{12} = 0.65; \\ - \varrho_{II2} = \frac{157}{0.0018} \quad - \varrho_{III1} = \frac{144}{0.0034} \quad \lambda_{12} l_{12} = 33 \text{ m.}$$

$$I\ 5: \quad \varrho_{III5} = 0.0173 \quad \varrho_{II} = 0.0216 \quad f_{5I} = 0.24; \quad \lambda_{I5} = 0.81; \\ - \varrho_{I5} = \frac{150}{0.0023} \quad - \varrho_{III1} = \frac{119}{0.0097} \quad \lambda_{I5} l_{I5} = 178 \text{ m.}$$

$$4\ 5: \quad \varrho_{III5} = 0.0173 \quad \varrho_{I4} = 0.0161 \quad f_{54} = 5.8; \quad \lambda_{45} = 0.15; \\ - \varrho_{I5} = \frac{150}{0.0023} \quad - \varrho_{III4} = \frac{157}{0.0004} \quad \lambda_{45} l_{45} = 10 \text{ m.}$$

$$4\ 6: \quad \varrho_{III6} = 0.0178 \quad \varrho_{I4} = 0.0161 \quad f_{64} = 11.2; \quad \lambda_{46} = 0.08; \\ - \varrho_{I6} = \frac{133}{0.0045} \quad - \varrho_{III4} = \frac{157}{0.0004} \quad \lambda_{46} l_{46} = 8 \text{ m.}$$

$$6\ 7: \quad \varrho_{II7} = 0.0205 \quad \varrho_{III6} = 0.0178 \quad f_{76} = 2.6; \quad \lambda_{67} = 0.28; \\ - \varrho_{III7} = \frac{151}{0.0054} \quad - \varrho_{III6} = \frac{157}{0.0021} \quad \lambda_{67} l_{67} = 28 \text{ m.}$$

Diese Zahlen geben die in Fig. 122 durch strichpunktierte Linien gekennzeichneten Grenzen der Netzbezirke, die für gleichzeitige Belastungsänderungen in Frage kommen.

Wir wollen nun die folgenden beiden Fälle untersuchen:

1. Jeder Bezirk wird im ganzen um 33% entlastet.
2. Jede der grossen Einzellasten wird um 100% entlastet.

ad 1) Bezirk I.

In Anwendung gelangen hier die Gleichungen (XXVIII d), (XXIX d), (188) und (193), und zwar erhalten sie für den vorliegenden Fall die folgende Form:

Ausgleich I II

$$a_{III} = \frac{n_I \Sigma u_n J_n}{\Sigma (q_{In} - q_{II n}) u_n J_n} \cdot \frac{1}{p_s}$$

$$p_{III} = \frac{\Sigma u_n J_n}{a_{III} J_{0I}}$$

$$f_{mn} = \frac{q_{II m} - q_{Im}}{q_{In} - q_{II n}}$$

Ausgleich I III

$$a_{III} = \frac{n_I \Sigma u_n J_n}{\Sigma (q_{In} - q_{III n}) u_n J_n} \cdot \frac{1}{p_s}; n = I, 1.$$

$$p_{III} = \frac{\Sigma u_n J_n}{a_{III} J_{0I}}$$

$$f_{mn} = \frac{q_{III m} - q_{Im}}{q_{In} - q_{III n}}; m = 1, 2, 4, 5.$$

$$u_n J_n = \Sigma u_n (i_v)_n = 0.33 \Sigma i_v [1 - \lambda (1 + f_{mn})].$$

Bestimmung der Grössen f_{mn} .

Strecke I 1 ($n = I, m = 1$).

$$q_{III 1} - q_{I 1} = -0.0034$$

$$q_{II} - q_{III} = 0.0095$$

$$1 + f_{1I} = 0.65$$

$$q_{III 1} - q_{I 1} = -0.0046$$

$$q_{II} - q_{III} = 0.0097$$

$$1 + f_{1I} = 0.53.$$

Strecke I 3.

$$1 + f_{3I} = 1.52$$

$$1 + f_{3I} = 0.88$$

Strecke I 5.

$$1 + f_{5I} = 0.90$$

$$1 + f_{5I} = 1.24$$

Strecke 12.

$$1 + f_{21} = 1.65$$

$$1 + f_{21} = 0.67$$

Strecke 14.

$$1 + f_{41} = 0.59$$

$$1 + f_{41} = 0.91.$$

Übertragung der wirksamen Belastungsänderungen auf I und 1.

$$\text{Strecke I 1} \left\{ \begin{array}{ll} 21.3 \cdot 1 = 21.3 & 21.3 \cdot 1 = 21.3 \\ 12.5 \cdot 0.67 = 8.4 & 12.5 \cdot 0.73 = 9.1 \\ 100 \cdot 0.51 = 51.0 & 100 \cdot 0.60 = 60.0 \\ 12.5 \cdot 0.35 = 4.4 & 12.5 \cdot 0.47 = 5.9 \end{array} \right.$$

$$\text{I 3} \left\{ \begin{array}{ll} 15 \cdot 0.59 = 8.9 & 15 \cdot 0.76 = 11.4 \\ 13.8 \cdot 0.17 = 2.3 & 13.8 \cdot 0.52 = 7.2 \end{array} \right.$$

$$\text{I 5} \left\{ \begin{array}{ll} 15 \cdot 0.75 = 11.3 & 15 \cdot 0.64 = 9.6 \\ 13.7 \cdot 0.51 = 7.0 & 13.7 \cdot 0.32 = 4.4 \\ 12.5 \cdot 0.30 = 3.7 & 12.5 \cdot 0.07 = 0.9 \end{array} \right.$$

$$u_I J_I = 118.3 \cdot 0.33 = 39.1 \quad u_I J_I = 129.8 \cdot 0.33 = 42.8$$

$$(q_{II} - q_{III}) \cdot 39.1 = 0.39 \quad (q_{II} - q_{III}) 42.8 = 0.43$$

$$\begin{aligned}
 12 \quad & 6.3 \cdot 0.18 = 1.1 & 6.3 \cdot 0.67 = 4.2 \\
 14 \quad & \left\{ \begin{array}{l} 6.2 \cdot 0.70 = 4.3 \\ 13.8 \cdot 0.31 = 4.3 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 6.2 \cdot 0.55 = 3.4 \\ 13.8 \cdot 0.09 = 1.2 \end{array} \right. \\
 & u_1 J_1 = 9.7 \cdot 0.33 = 3.2 & u_1 J_1 = 9.0 \cdot 0.33 = 3.0 \\
 (q_{I1} - q_{III1}) 3.2 = 0.01 & & (q_{I1} - q_{III1}) 3.0 = 0.01 \\
 \Sigma u_n J_n = 42.3 & & \Sigma u_n J_n = 45.8 \\
 \Sigma (q_{In} - q_{III n}) u_n J_n = 0.40 & & \Sigma (q_{In} - q_{III n}) u_n J_n = 0.44. \\
 a_{I1} = \frac{41.3 \cdot 10^{-3} \cdot 42.3}{0.40 \cdot 0.10} = 44 & & a_{I111} = \frac{41.3 \cdot 10^{-3} \cdot 45.8}{0.44 \cdot 0.10} = 47 \\
 p_{I11} = \frac{42.3}{44 \cdot 266} = 0.0036 & & p_{I111} = \frac{45.8}{47 \cdot 266} = 0.0037 \\
 \varepsilon_{I11} = 0.0036 \cdot 110 = 0.40 \text{ Volt} & & \varepsilon_{I111} = 0.0037 \cdot 110 = 0.41 \text{ Volt.}
 \end{aligned}$$

ad 1) Bezirk III.

Strecke III 6.

$$1 + f_{6111} = 0.48 \quad 1 + f_{6111} = 0.70$$

Strecke III 5.

$$1 + f_{5111} = 0.80 \quad 1 + f_{5111} = 0.62$$

Strecke 54.

$$1 + f_{45} = 1.17 \quad 1 + f_{45} = 0.70$$

Strecke 64.

$$1 + f_{46} = 1.09 \quad 1 + f_{46} = 0.52.$$

Übertragung der wirksamen Belastungsänderungen auf III, 5 und 6.

$$\begin{aligned}
 \text{Strecke III 6} \quad & \left\{ \begin{array}{l} 10.6 \cdot 1 = 10.6 \\ 8.7 \cdot 0.76 = 6.6 \\ 16.9 \cdot 0.52 = 8.8 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 10.6 \cdot 1 = 10.6 \\ 8.7 \cdot 0.65 = 5.6 \\ 16.9 \cdot 0.30 = 5.1 \end{array} \right. \\
 \text{III 5} \quad & \left\{ \begin{array}{l} 12.5 \cdot 0.60 = 7.5 \\ 16.9 \cdot 0.20 = 3.4 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 12.5 \cdot 0.69 = 8.6 \\ 16.9 \cdot 0.38 = 6.4 \end{array} \right. \\
 & u_{III} J_{III} = 36.9 \cdot 0.33 = 12.2 & u_{III} J_{III} = 36.3 \cdot 0.33 = 12.0 \\
 (q_{III111} - q_{I111}) 12.2 = 0.09. & & (q_{III111} - q_{I111}) 12.0 = 0.09. \\
 54. \quad & \left\{ \begin{array}{l} 8.8 \cdot 0.42 = 3.7 \\ u_5 J_5 = 3.7 \cdot 0.33 = 1.2 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 8.8 \cdot 0.65 = 5.7 \\ u_5 J_5 = 5.7 \cdot 0.33 = 1.9 \end{array} \right. \\
 (q_{III5} - q_{I5}) 1.2 = 0.00 & & (q_{III5} - q_{I5}) 1.9 = 0.00 \\
 64. \quad & \left\{ \begin{array}{l} 250 \cdot 0.73 = 182.0 \\ 12.5 \cdot 0.45 = 5.6 \\ u_6 J_6 = 187.6 \cdot 0.33 = 62.0 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 250 \cdot 0.87 = 217.5 \\ 12.5 \cdot 0.74 = 9.3 \\ u_6 J_6 = 226.8 \cdot 0.33 = 75.0 \end{array} \right. \\
 (q_{III6} - q_{I6}) 62.0 = 0.28 & & (q_{III6} - q_{I6}) 75.0 = 0.16 \\
 \Sigma u_n J_n = 75.4 & & \Sigma u_n J_n = 88.9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma (\varrho_{III n} - \varrho_{I n}) u_n J_n &= 0.37 & \Sigma (\varrho_{III n} - \varrho_{II n}) u_n J_n &= 0.25 \\ a_{III} &= \frac{40.5 \cdot 10^{-3} \cdot 75.4}{0.37 \cdot 0.10} = 82 & a_{IIII} &= \frac{40.5 \cdot 10^{-3} \cdot 88.9}{0.25 \cdot 0.10} = 144 \\ p_{III} &= \frac{75.4}{82 \cdot 272} = 0.0034 & p_{IIII} &= \frac{88.9}{144 \cdot 272} = 0.0023 \\ \varepsilon_{III} &= 0.37. & \varepsilon_{IIII} &= 0.25.\end{aligned}$$

Den Ausgleich des Bezirks II brauchen wir nicht zu berechnen, da er nach den bisherigen günstigen Ergebnissen auch genügen dürfte.

Als Kontrolle wurden die neuen Knotenpunktsbelastungen, wie sie sich für den nur 33% entlasteten Bezirk I berechnen, in die ersten drei Gleichungen des Systems (178) (S. 176) eingesetzt. Es ergaben sich die Spannungsverluste

$$\varepsilon_I = 9.48; \quad \varepsilon_{II} = 9.86; \quad \varepsilon_{III} = 9.89,$$

so dass in der That mit genügender Übereinstimmung

$$\varepsilon_{II} = 0.38 \text{ und } \varepsilon_{III} = 0.41$$

erhalten wird.

ad 2) Belastung 250 Amp. in Bezirk III vollständig entlastet.

Die wirksame Belastungsänderung wird auf den Knotenpunkt 6 übertragen; es treten die Gleichungen (XXVIII c), (XXIX c), (188) und (189) in Wirksamkeit, und zwar lauten sie für diesen Fall:

$$\begin{aligned}a_{III} &= \frac{1}{\varrho_{III 6} - \varrho_{I 6}} \cdot \frac{n_{III}}{p_*} & a_{IIII} &= \frac{1}{\varrho_{III 6} - \varrho_{II 6}} \cdot \frac{n_{III}}{p_*} \\ p_{III} &= \frac{u_6 J_6}{a_{III} J_{0 III}} & p_{IIII} &= \frac{u_6 J_6}{a_{IIII} J_{0 III}} \\ f_{46} &= \frac{\varrho_{I 4} - \varrho_{III 4}}{\varrho_{III 6} - \varrho_{I 6}} & f_{46} &= \frac{\varrho_{II 4} - \varrho_{III 4}}{\varrho_{III 6} - \varrho_{II 6}} \\ u_6 J_6 &= 250 [1 - 0.25 (1 + f_{46})].\end{aligned}$$

Nach dem Vorhergehenden ist

$$\begin{aligned}1 + f_{46} &= 1.09 & 1 + f_{46} &= 0.52 \\ u_6 J_6 &= 250 \cdot 0.73 = 182.0 & u_6 J_6 &= 250 \cdot 0.87 = 217.5.\end{aligned}$$

Also wird

$$a_{III} = \frac{40.5 \cdot 10^{-3}}{0.0045 \cdot 0.10} = 90 \quad a_{IIII} = \frac{40.5 \cdot 10^{-3}}{0.0021 \cdot 0.10} = 192.$$

Die Ausgleichsgrößen sind so reichlich, dass wir auf die Berechnung des Ausgleichs für die Belastung 100 Amp. im Bezirk I verzichten können. Dieses Beispiel mit seinen in bezug auf die Belastung ungünstigen, in bezug auf prozentuale Spannungsverluste im Verteilungs- und Speisetz jedenfalls nicht gerade günstigen Verhältnissen ergibt überhaupt so vorzügliche Ausgleichswerte, dass der Schluss nicht unberechtigt zu sein scheint, dass in sich vollständig geschlossene Netze im allgemeinen stets einen genügenden Ausgleich aufweisen werden und nur in Ausnahmefällen durch Ausgleichs-

leiter oder verstärkte Verteilungsleiter für eine Besserung des Ausgleichs gesorgt werden muss. Anders liegen allerdings die Verhältnisse, wenn ein Netz aus mehreren, nur durch einzelne Stränge zusammenhängenden Teilen besteht, da dann leichter grössere Potentialunterschiede zwischen einzelnen Speisepunkten auftreten können.

Für das gleiche Netz wurde der Ausgleich auch nach Gleichung (XXVIII) (S. 166) berechnet, indem es, allerdings zur Vereinfachung unter Vernachlässigung einiger Querleiter geringeren Querschnitts, widerstandstreu zum einfachen Strang umgebildet wurde. Die erhaltenen Werte sind für Bezirk I und III:

$$a_{I II} = 35; \quad a_{I III} = 22; \quad a_{III I} = 48; \quad a_{III II} = 32.$$

Es ergab sich also das bemerkenswerte Resultat, dass die erhaltenen Zahlen zum Teil ganz wesentlich kleiner sind, offenbar infolge der zulässig erachteten Vernachlässigung von Querleitern. Es folgt ja auch aus unseren Entwicklungen, dass eine einheitliche Ausgleichsgrösse für einen Netzbezirk nicht vorhanden ist, da sie von seiner Belastungsänderung abhängig ist.

Wechselstromnetze.

107.

Bestandteile
des Wechsel-
stromnetzes.

Der Wechselstrom hat vor dem Gleichstrom den grossen Vorteil der leichten Transformierbarkeit mittels ruhender Apparate, der Transformatoren, so dass man den ersteren gern in solchen Anlagen verwendet, deren Verbrauchsgebiet sehr ausgedehnt oder deren Energiequelle vom Ort des Verbrauchs sehr weit entfernt ist, da, wie wir noch sehen werden, die Kosten des Netzes bei den normalen Glühlampenspannungen für grössere Entfernungen bald so hoch werden, dass die Rentabilität der Unternehmung nicht genügt. Ferner wird es sich zeigen, dass die Leitungskosten sich umgekehrt proportional zu dem Quadrat der angewendeten Betriebsspannung verhalten. Man verwendet daher für die Übertragung weit entfernter Energiequellen hochgespannten Wechselstrom, der im Verteilungsgebiet in den für den Betrieb der verschiedenen Verbrauchsapparate nötigen niedrig gespannten Strom transformiert wird. Die Transformatoren sind daher das Bindeglied zwischen dem hoch- und niedergespannten Strom; ihre Hochspannungsseite bildet den Verbrauchsapparat gegenüber den Hochspannungsenergieerzeugern, ihre Niederspannungsseite dagegen den Energieerzeuger für die Niederspannungsverbraucher. Wir haben also im allgemeinen viele Hochspannungsverbrauchsapparate gegenüber einem Energieerzeuger, bedürfen also stets eines Hochspannungsnetzes, des „Primärnetzes“, das die ersteren miteinander und mit dem letzteren verbindet und, wenn nötig, die infolge veränderlichen Energieverbrauchs entstehenden Spannungsschwankungen ausgleicht. Dagegen brauchen wir hier nicht notwendiger Weise ein Niederspannungsnetz, ein „Sekundärnetz“, da ja für jeden Energieverbraucher ein besonderer Transformator als Energieerzeuger an das vorhandene Primärnetz angeschlossen werden könnte, der noch dazu jede beliebige, dem Verbraucher günstigste Sekundärspannung zu liefern imstande ist.

In der That wird man auch auf die Verlegung eines besonderen Sekundärnetzes verzichten und an jeder Verbrauchsstelle einen eigenen Transformator aufstellen, wenn die einzelnen Energieverbraucher grosse Energiemengen be-

strommotoren, der bei grosser Phasenverschiebung meist das zwei- bis dreifache des normalen Volllaststromes beträgt. Denn durch ihn werden, besonders bei grossen Motoren, vielfach derartige Schwankungen der Netzspannung verursacht, dass sie für den Lichtbetrieb störend wirken. Man giebt daher gern grösseren Motoren eigene Transformatoren und sieht, falls der Verbrauch für mechanische Energie bedeutend ist, für diesen ein eigenes Netz vor, in dem ein grösserer Spannungsverlust — etwa 5 bis 10% — zulässig ist.

109.
Das
Primärnetz.

Die Belastung des Primärnetzes ist stets induktiv, da sie ja durch die Transformatoren gebildet wird. Dagegen sind bei den hohen Spannungen die die Belastung bildenden Ströme von geringer Grösse, so dass nur eine geringe Zahl äquipotentieller Speisepunkte, die weit voneinander entfernt liegen, nötig wird, um so mehr, als der absolut zulässige Spannungsverlust selbst bei geringen prozentualen Verlusten gross ist. So lange die Kabel des eigentlichen geschlossenen Primärnetzes keine allzu grossen Längen besitzen, kann auch hier die Wirkung von Kapazität und Induktivität vernachlässigt werden. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich also um geschlossene Primärnetze von grosser Ausdehnung, so sind die Impedanzen und Admittanzen der Kabel an Stelle der Widerstände und Leitfähigkeiten in Rechnung zu setzen. Die Gültigkeit der Netzgleichungen wird dadurch nicht beseitigt, es ergeben sich jedoch, wie im Abschnitt [87] gezeigt, in diesem Falle $2n$ Gleichungen mit $2n$ Unbekannten, nämlich den Energiekomponenten und den energielosen Komponenten der Knotenpunktspannungsverluste.

Hier kann ferner der Fall eintreten, dass die Bedingung für die Konvergenz des GAUSS'schen Verfahrens

$$g_{\mu\nu} \geq \sum g_{\mu\nu} \left(\mu \gtrless \nu \right)$$

nicht erfüllt ist; dagegen bleibt stets

$$g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$$

und es kann daher zur Lösung der Netzgleichungen das VERHOECKX'sche Verfahren [83 ff.] angewendet werden.

Da die Primärnetze bei der grossen Entfernung der auf konstantem bzw. gleichem Potential zu haltenden Speisepunkte sehr einfacher Natur sind und nur wenige Maschen und Knoten zu bilden pflegen, so ist die Anzahl der zu lösenden Gleichungen meist gering und daher ihre Lösung einfacher als bei Niederspannungsnetzen. Dagegen ist, gerade wegen der geringen Zahl der Speisepunkte und der vielfach nicht geschlossenen Form der Hochspannungsnetze, um so mehr die Berechnung auf Ausgleich geboten [95 ff.].

Der Spannungsverlust in den Primärnetzen wird meist sehr niedrig gehalten werden können und sehr selten 1% der Betriebsspannung übersteigen.

$$\left. \begin{aligned} \sum \frac{k_{1r}}{l_{1r}} \varepsilon_1 q - \frac{k_{12}}{l_{12}} \varepsilon_2 q - \dots - \frac{k_{1r}}{l_{1r}} \varepsilon_r q - \dots - \frac{k_{1n}}{l_{1n}} \varepsilon_n q &= \varrho J_1 \\ - \frac{k_{21}}{l_{21}} \varepsilon_1 q + \sum \frac{k_{2r}}{l_{2r}} \varepsilon_2 q - \dots - \frac{k_{2r}}{l_{2r}} \varepsilon_r q - \dots - \frac{k_{2n}}{l_{2n}} \varepsilon_n q &= \varrho J_2 \\ \dots & \\ \dots & \end{aligned} \right\} \text{(XXXII)}$$

Betrachten wir hier die $\varepsilon_v q$ als Unbekannte, so sind diese genau wie früher die ε_v bestimmt und berechenbar. Mit ihrer Hilfe aber erhalten wir:

$$J_{v\mu} = \frac{\varepsilon_\mu - \varepsilon_v}{w_{v\mu}} = \frac{\varepsilon_\mu - \varepsilon_v}{l_{v\mu} q} k_{v\mu} q = (\varepsilon_\mu q - \varepsilon_v q) \frac{k_{v\mu}}{l_{v\mu} q}, \quad . \quad . \quad (195)$$

eine Gleichung, in der alle Grössen der rechten Seite bekannt sind. Die Stromverteilung ist also eindeutig bestimmt, sobald das Verhältnis der Querschnitte bekannt ist, und damit ist die Berechnung geschlossener Leitungsnetze auf offene Leiter zurückgeführt.

Die eben entwickelte Lösung befriedigt noch nicht vollkommen, denn sie enthält noch ein vorwiegend subjektives Moment, nämlich die Annahme der Querschnittsverhältnisse, wodurch eine gewisse Unsicherheit in die Rechnung hineingetragen wird. Wir können uns hiervon frei machen, wenn wir mit MÜLLENDORFF¹⁾ den Speisungsbereich jedes Speisepunktes so abgrenzen, dass das Kupfervolumen der Verteilungs- und Speiseleitungen zusammen ein Minimum wird.

Ist i_v eine zwischen den Speisepunkten I und II liegende Belastung (Fig. 124), so wird bei gegebenem maximalen Spannungsverlust augenschein-

112.
Querschnittsberechnung geschlossener Netze auf Grund des günstigsten Speisungsbereichs. (Müllendorff.)

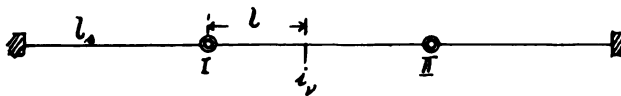


Fig. 124.

lich die geringste Kupfermenge benötigt, wenn der ganze Strom i_v allein von der näheren Seite her geliefert wird, und zwar wird dann das Kupfervolumen:

$$V = \left(\frac{l_a^2}{\varepsilon_a} + \frac{l^2}{\varepsilon} \right) i_v q.$$

Das Kupferminimum hängt also von dem Ausdruck

$$\frac{l_a^2}{\varepsilon_a} + \frac{l^2}{\varepsilon}$$

ab. Daraus folgt: Wir können jedem Speisepunkt ein bestimmtes Speisungsgebiet zuweisen, so dass jeder in ihm liegende Anschluss günstiger von diesem als von jedem anderen Speisepunkt gespeist wird. Zu diesem Zweck haben wir bei allen Belastungen den Ausdruck $\frac{l_a^2}{\varepsilon_a} + \frac{l^2}{\varepsilon}$ für alle möglichen Stromwege zu bilden und die Belastung demjenigen Speisepunkt zuzuweisen, der den geringsten Wert der Summe aufweist. Da diese Summe von der Belastung selbst unabhängig ist, so verfährt man am einfachsten in der Weise, dass man für jeden unmittelbaren Verbindungsweg zweier Speisepunkte oder für eine Gruppe solcher Verbindungswege die Grössen $\frac{l_a^2}{\varepsilon_a}$ bildet, also in

1) E. MÜLLENDORFF: Die rationelle Berechnung von Stromverteilungsnetzen. ETZ 1904, S. 295, und: Die Feststellung der natürlichen Aktionsgebiete der Speisepunkte... Ebenda, S. 973.

dem einfachen Falle der Fig. 124 z. B. die Quotienten $\frac{l_I^2}{\epsilon_s}$ und $\frac{l_{II}^2}{\epsilon_s}$; deren Differenz giebt dann sofort diejenige Grösse $\frac{l^2}{\epsilon} = \frac{l_I^2}{\epsilon_s} - \frac{l_{II}^2}{\epsilon_s}$, die zu dem kleineren Quotient, hier $\frac{l_{II}^2}{\epsilon_s}$, hinzugefügt werden muss, ehe der andere Speisepunkt I zur Speisung herangezogen werden darf. Die Wurzel aus dem letzten Produkt, also die Länge $\lambda = \sqrt{\frac{l^2}{\epsilon}}$ nennen wir den „vorläufigen Speisungsbereich“ des betreffenden Speisepunktes. Für den Rest der Länge l_{III} kommen nun infolge der Gleichheit der Grössen $\frac{l_I^2}{\epsilon_s}$ und $\frac{l_{II}^2}{\epsilon_s} + \frac{l^2}{\epsilon}$ beide Speisepunkte gleichmässig zur Wirkung, wir haben also nur die Länge

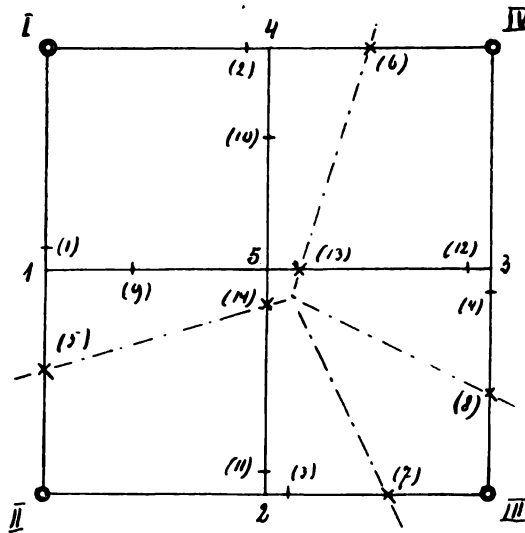


Fig. 125.

$l_{III} - \lambda$ zu halbieren und erhalten so die „wirksamen Speisebereiche“ beider Speisepunkte.

Ein Beispiel wird am besten das skizzierte Verfahren erläutern. Gegeben sei ein Netz gemäss Fig. 125 mit quadratischen Maschen, deren Seiten je 100 m lang seien. Die Centrale soll 300 m links von I liegen, so dass die Speiseleiter die folgenden Längen haben:

$$l_I = 300, \quad l_{II} = l_{IV} = 500, \quad l_{III} = 700.$$

Ferner sei

$$\epsilon_s = 10, \quad \epsilon = 2 \text{ Volt.}$$

Dann wird

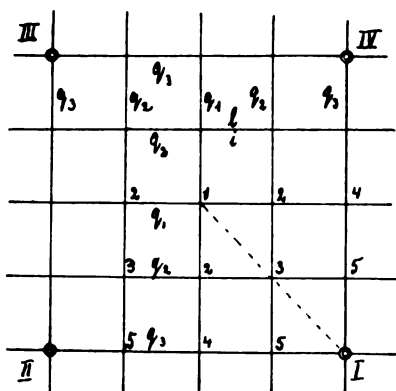
$$\frac{l_I^2}{\epsilon_s} = 9000; \quad \frac{l_{II}^2}{\epsilon_s} = \frac{l_{IV}^2}{\epsilon_s} = 25000; \quad \frac{l_{III}^2}{\epsilon_s} = 49000.$$

Für die Strecke $I1IV$, $I4IV$ u. s. w. kommen nur zwei Speisepunkte, I und II , I und IV u. s. w. in Frage, also wird

$$\lambda_{III} = \sqrt{\frac{25000 - 9000}{2}} = 89 \text{ m} = \lambda_{IV}; \quad \lambda_{III} = \lambda_{IV} = 0.$$

$$\lambda_{III} = \lambda_{IV} = \sqrt{\frac{24000}{2}} = 110 \text{ m}; \quad \lambda_{III} = \lambda_{IV} = 0.$$

Ungleichheit der Speisebereiche die Notwendigkeit einer anderen Gruppierung der Speisepunkte andeuten; man wird stets danach zu streben haben, die Speisebezirke bzw. deren Belastung möglichst gleich gross zu machen. Sind schliesslich die an den Grenzen der Speisebezirke zusammenstossenden, für den grössten Spannungsverlust berechneten Leiterquerschnitte gleich oder nahezu gleich, so wird man sie ohne weiteres zusammenschliessen können, indem man für die ganze Strecke den nächstliegenden Normalquerschnitt wählt. Auch wenn der schliesslich verlegte Querschnitt von dem berechneten abweicht, wird in diesem Falle eine Änderung der Stromverteilung nicht eintreten. Sind dagegen diese Querschnitte sehr verschieden, und wählt man etwa einen mittleren Normalquerschnitt für die ganze Strecke, so würde man dadurch die Speisepunkte zur Stromlieferung in fremde Gebiete zwingen, also eine ungünstige Stromverteilung herbeiführen. Auch dies würde andeuten, dass die Lage der Speisepunkte günstiger zu gestalten ist.



Beispiel.

Fig. 126.

Wie man sieht, ist die Querschnittsbemessung eines Netzes nicht eine ausschliesslich mathematische Aufgabe, sie kann überhaupt nicht auf nur rechnerischem Wege gelöst werden, sondern es ist vielfaches Tasten und Ändern erforderlich, um die günstigsten Verhältnisse zu erhalten. Der Geübte freilich wird eben auf Grund seiner Erfahrung oft ohne viele Rechnungen die Bemessung der Querschnitte vornehmen können, aber diese Erfahrung hat er nur durch viele Berechnungen erwerben können.

Als Beispiel einer Querschnittsberechnung bei gegebener Zahl und Lage der Speisepunkte wollen wir hier ein Netz

berechnen, das aus lauter Quadraten besteht, und zwar soll der in der Fig. 126 gezeichnete Bezirk einen Teil eines vollständig regelmässig angelegten Netzes darstellen, in dem die Entfernung der Speisepunkte vier Seitenlängen beträgt. Die Länge jeder Seite soll 1 Meter, die Belastung derselben i Amp. betragen und gleichmässig über die ganze Länge verteilt sein. Die Querschnitte der horizontalen und vertikalen Leiter sind konstant vorausgesetzt, und zwar sollen die Querschnitte aufeinander folgender horizontaler und vertikaler Strecken sich verhalten wie

$$\frac{1}{k_1} : \frac{1}{k_2} : \frac{1}{k_1},$$

also

$$k_3 q_3 = k_2 q_2 = k_1 q_1 = q$$

sein.

Hier ist zunächst klar, dass die Stromverteilung sich vollkommen symmetrisch gestalten muss; sowohl die mittleren Strecken vom Querschnitt q_1 als auch die Diagonalen des von vier Speisepunkten gebildeten Quadrats sind Symmetrieachsen, da ja die Querschnitte zu beiden Seiten derselben gleich sind. Die Ströme in ähnlich gelegenen Seiten und die Spannungsverluste in ähnlich gelegenen Knotenpunkten sind daher gleich, und wir er-

halten die in der Fig. 126 dargestellte Knotenpunktsbezeichnung, aus der hervorgeht, dass wir fünf Unbekannte $\varepsilon_1 q$ bis $\varepsilon_5 q$ haben, die uns die folgenden fünf Gleichungen liefern:

$$\begin{aligned} \frac{4}{k_1} \varepsilon_1 q - \frac{4}{k_1} \varepsilon_2 q &= 2 i l q \\ - \frac{1}{k_1} \varepsilon_1 q + 2 \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) \varepsilon_2 q - \frac{2}{k_3} \varepsilon_3 q - \frac{1}{k_1} \varepsilon_4 q &= 2 i l q \\ - \frac{2}{k_2} \varepsilon_2 q + \frac{4}{k_2} \varepsilon_3 q - \frac{2}{k_2} \varepsilon_5 q &= 2 i l q \\ - \frac{2}{k_1} \varepsilon_2 q + 2 \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_3} \right) \varepsilon_4 q - \frac{2}{k_3} \varepsilon_5 q &= 2 i l q \\ - \frac{2}{k_2} \varepsilon_3 q - \frac{1}{k_3} \varepsilon_4 q + 2 \left(\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \right) \varepsilon_5 q &= 2 i l q. \end{aligned}$$

Die Lösung derselben ergibt:

$$\begin{aligned} \varepsilon_6 q &= 7.5 k_3 i l q \\ \varepsilon_4 q &= \frac{8.5 k_1 k_3 + 12 k_2 k_3 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q \\ \varepsilon_3 q &= \frac{2.25 k_1 k_2 + 7.5 k_1 k_3 + 10.25 k_2 k_3 + 0.5 k_2^2 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q \\ \varepsilon_2 q &= \frac{3.5 k_1 k_2 + 7.5 k_1 k_3 + 12 k_2 k_3 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q \\ \varepsilon_1 q &= \frac{4 k_1 k_2 + 8 k_1 k_3 + 12 k_2 k_3 + 0.5 k_1^2 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q. \end{aligned}$$

Da nun ε_1 der grösste Spannungsverlust ist und den Wert ε annehmen soll, so wird

$$q = \frac{4 k_1 k_2 + 8 k_1 k_3 + 12 k_2 k_3 + 0.5 k_1^2 + 7.5 k_3^2 i l q}{k_1 + k_2 + k_3 \varepsilon}.$$

Für durchgehend gleiche Querschnitte, also für $k_3 = k_2 = k_1$, wird

$$q = \frac{32}{3} \frac{i l q}{\varepsilon}.$$

Verhalten sich die aufeinander folgenden Querschnitte wie

$$1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4},$$

ist also

$$k_3 = 1, \quad k_2 = 2, \quad k_1 = 4,$$

so wird

$$q = q_3 = 14.8 \frac{i l q}{\varepsilon}, \quad q_2 = 7.4 \frac{i l q}{\varepsilon}, \quad q_1 = 3.7 \frac{i l q}{\varepsilon}.$$

In ihrer ganzen Allgemeinheit für beliebig gestaltete Netze lässt sich die Aufgabe, die günstigste Zahl und Lage der Speisepunkte zu bestimmen, mathematisch nicht angreifen, und man wäre daher auf Vergleichsrechnungen angewiesen, d. h. man hätte das Netz für eine Reihe von Speisepunktzahlen

zu berechnen und diejenige Anzahl zu wählen, die den geringsten Kostenaufwand erfordert. Vergleichende Rechnungen, die A. SENDEL¹⁾ an verschiedenen, für die mathematische Behandlung besonders günstig gestalteten Netzen angestellt hat, haben jedoch Formeln für die Ermittlung der günstigsten Speisepunktzahl gezeitigt, die für die verschiedenen behandelten Netzformen eine so gute Übereinstimmung zeigen, dass ihre Anwendung auch auf beliebig gestaltete Netze gerechtfertigt erscheint.

SENDEL unterzog Netze der Rechnung, die aus lauter regulären Figuren zusammengesetzt waren, nämlich aus Quadraten, Dreiecken und Sechsecken (s. Fig. 127 bis 129), deren Seiten gleichmässig belastet sind. Wir wollen, um das Verfahren zu erläutern, die Berechnung der ersten dieser Netzformen durchführen, indem wir die Gesamtkosten abhängig von der Speisepunktzahl oder einer anderen mit dieser zusammenhängenden unabhängigen Veränderlichen aufstellen. Wir setzen dann in bekannter Weise den Differential-

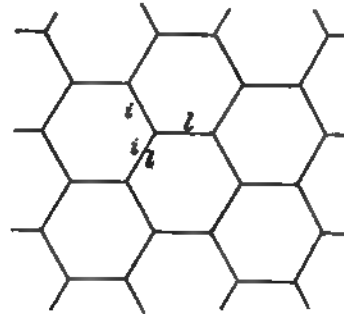


Fig. 127.

Fig. 128.

Fig. 129.

quotient dieses Ausdruckes nach der Unabhängigen gleich Null und erhalten so die Gleichung für den gesuchten günstigsten Wert.

Die Betrachtungen können ganz allgemein, ohne Rücksicht auf die Stromart (Gleich-, Wechsel-, Drehstrom) und ohne Rücksicht auf die Netzanordnung (Zwei- oder Mehrleiternetz) durchgeführt werden, wenn man die zu liefernde Energie in der Form

$$\epsilon = i E \zeta$$

schreibt. Bezüglich des Spannungsverlustes ist zu berücksichtigen, dass, wenn ϵ seinen grössten Wert bedeutet, bei Wechselstromlinien der Spannungsabfall $\frac{\epsilon}{\cos \varphi}$ betragen darf [108], wobei φ die mittlere Phasenverschiebung von Strom und Spannung gegen Null (E) bedeutet. Setzen wir also allgemein für den maximal zulässigen Spannungsabfall

$$\frac{\epsilon}{\cos \varphi} = \frac{p}{\cos \varphi} E,$$

1) A. SENDEL: Bestimmung der günstigsten Zahl von Speisepunkten eines Netzes. ETZ 1899, S. 807. Vgl. auch R. HAAS: Über die günstigste Verteilung der Speisepunkte längs einer einzigen Verteilungsleitung. ETZ 1896, S. 130, und J. TEICHMÜLLER: Elektrische Leitungen.

so wird bei Gleichstrom

$$\zeta = 1, \quad \varepsilon = \frac{1}{2} E \quad \text{und} \quad \cos \varphi = 1,$$

bei Wechselstrom

$$\zeta = \cos \varphi, \quad \varepsilon = \frac{1}{2} E$$

und bei Drehstrom

$$\zeta = \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \quad \text{und} \quad \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} E.$$

Ferner können wir alle auf die Bildung des Kupfervolumens oder der Leitungskosten bezüglichen Operationen auf einen Leiter beschränken. Denn die Mittelleiter werden bei Mehrleitersystemen allgemein nicht in die Speisekästen eingeführt (weil sie gemäss den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker nicht gesichert werden dürfen), sondern zu einem besonderen Mittelleiternetz vereinigt; das Gesamtvolumen bzw. die Gesamtkosten unterscheiden sich also von den entsprechenden Werten eines Leiters nur durch einen konstanten Faktor, der bei der Differentiation verschwindet, da ja der Differentialquotient gleich Null gesetzt wird.

Für alle aus regulären Polygonen bestehenden Netzformen sei l die Länge einer Polygonseite, i deren Belastung in Ampere. Ferner wollen wir die für das Verteilungsnetz gültigen Bezeichnungen ohne Index, die gleichen Grössen des Speisernetzes mit dem Index s schreiben. Wir bezeichnen hier mit

115.
Fortsetzung.
Bezeichnungen.

- N die Gesamtzahl der Speisepunkte,
- S die Gesamtzahl aller Polygonseiten des Netzes,
- l_1 die gerade Entfernung zweier Speisepunkte in Metern,
- $n_1 = \frac{S}{N}$ die auf einen Speisepunkt entfallende Zahl der Polygonseiten,
- n die Anzahl der zwischen zwei Speisepunkten liegenden Polygonseiten,
- V das gesamte auf einen Speisepunkt entfallende Kupfervolumen des Verteilungsnetzes, also
- V_s das Kupfervolumen einer Speiseleitung, beide bezogen auf die einfache Länge des Leiters, in cm^3 ,
- \mathcal{E} die gesamte vom Netz zu liefernde Energie in Watt,
- $e = i E \zeta$ die auf eine Polygonseite entfallende Energie in Watt,
- $\sigma = \frac{\mathcal{E}}{o}$ die Flächendichte der Belastung in Watt/m^2 ,
- o die vom Netz bedeckte Fläche in Quadratmetern.

Wir können zunächst allgemein l_1 und n_1 als Funktionen von l und n ausdrücken, da ja in der Praxis die Speisepunkte stets in einen Kreuzungspunkt des Netzes gelegt werden. Wir können also schreiben:

116.
Fortsetzung.
Die Netzkosten.

$$l_1 = \varphi(l, n); \quad n_1 = f(n) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (196)$$

Daher wird

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{S}{f(n)} \\ \mathcal{E} &= S e \\ e &= \zeta i E = \zeta \beta l^2 \sigma, \end{aligned} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (197)$$

wobei β ein von der Netzanordnung abhängiger Zahlenfaktor ist. Hieraus folgt:

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{\mathfrak{E}}{\zeta \beta l^2 \sigma} \\ \text{und} \\ N &= \frac{\mathfrak{E}}{\zeta i E f(n)} = \frac{\mathfrak{E}}{\zeta \beta l^2 \sigma f(n)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (198)$$

N und l_1 bilden die unabhängigen Veränderlichen, die beide durch die Gleichungen (196) und (198) mit l zusammenhängen. Wählen wir l als Veränderliche, so haben wir nunmehr die Netzkosten in Abhängigkeit von l aufzustellen.

Bezeichnen wir mit α einen von der Netzanordnung und n abhängigen Zahlenwert, so können wir setzen:

$$V = \alpha \frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon} \cos \varphi = \alpha \frac{i l^2 \varrho}{p \varepsilon} \cos \varphi.$$

Ist weiterhin c der Preis eines Kilogramms Kupfer in Mark, γ das spezifische Gewicht des Kupfers, so erhalten wir zunächst für blanke Kupferleitungen als Kosten des Verteilungsnetzes, bezogen auf die einfache Leiterlänge:

$$K_v = \frac{V \gamma c}{1000} N = \alpha \frac{i l^2 \varrho}{p \varepsilon} \cos \varphi \cdot \frac{\gamma c}{1000} \frac{\mathfrak{E}}{\zeta i E f(n)}$$

oder, wenn alle Materialkonstanten des Leiters zusammengefasst werden, indem

$$C = \frac{\varrho \gamma c}{1000}$$

gesetzt wird:

$$K_v = C \frac{\mathfrak{E}}{\varepsilon E} \cdot \frac{l^2 \alpha}{p f(n)} \cdot \frac{\cos \varphi}{\zeta}.$$

Bezeichnet ferner m die Kosten der Verlegung eines Meters Draht, einschliesslich Isolatoren, so betragen die gesamten Montagekosten des Verteilungsnetzes

$$M_v = N l m = \frac{\mathfrak{E} m}{\zeta \beta l \sigma}.$$

Die Kosten für den Kupferaufwand und die Montage der Speiseleiter erhalten wir auf gleichem Wege zu

$$\begin{aligned} K_s &= C \frac{\mathfrak{E} l_s^2}{\varepsilon_s E} \frac{\cos \varphi}{\zeta} \\ M_s &= N l_s m = \frac{\mathfrak{E} l_s m}{\zeta \beta l_s^2 \sigma f(n)}. \end{aligned}$$

Bezeichnet schliesslich s die Kosten eines Speisepunktes, einschliesslich des Anschlusses der Speiseleitung in der Centrale, so betragen diese Kosten, bezogen auf einen Speiseleiter:

$$P = \frac{N s}{\xi} = \frac{\mathfrak{E} s}{\xi \zeta \beta l^2 \sigma f(n)},$$

wobei ξ für Gleich- und Wechselstrom den Wert 2, für Drehstrom den Wert 3 annimmt. Die gesamten Netzkosten sind also:

$$K = C \left\{ \frac{\mathfrak{E} l_s^2 \cos \varphi}{\epsilon_s E \zeta} + \frac{\mathfrak{E} l_s m}{\zeta \beta l^2 \sigma f(n)} + \frac{\mathfrak{E}_s}{\xi \zeta \beta l^2 \sigma f(n)} + C \frac{\mathfrak{E} l^2 \alpha \cos \varphi}{\epsilon E p f(n) \zeta} + \frac{\mathfrak{E} m}{\zeta \beta l \sigma} \right\} \quad (199)$$

Der erste Summand ist von l vollständig unabhängig und auch der letzte ist nur scheinbar von l abhängig, da für eine gegebene Belastung, also für eine gegebene Netzanordnung die Verlegungskosten von der Zahl der Speisepunkte unabhängig sind. Die übrigen drei Glieder enthalten ausser der Veränderlichen l noch die von der Netzform und n abhängigen Grössen α , β und $f(n)$; es wird sich jedoch zeigen, dass diese im Ergebnis nur in einer Verbindung erscheinen, die von l , n und der Netzform unabhängig ist. Sehen wir sie demnach als Konstanten an, so erhalten wir aus

$$\frac{dK}{dl} = - \frac{2 \mathfrak{E} l_s m}{\zeta \beta l^3 \sigma f(n)} - \frac{2 \mathfrak{E} s}{\xi \zeta \beta l^3 \sigma f(n)} + \frac{2 C \mathfrak{E} l \alpha \cos \varphi}{\epsilon E p f(n) \zeta} = 0$$

als wirtschaftliche Leiterlänge:

$$l_w = \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s \xi) p \epsilon E}{C \alpha \beta \sigma \cos \varphi}} \quad (200)$$

und vermittelt der Gleichung (197) die günstigste Zahl der Speisepunkte:

$$N_r = \frac{\mathfrak{E}}{\zeta f(n)} \sqrt[4]{\frac{C \alpha \cos \varphi}{(l_s m + s \xi) p \beta \sigma \epsilon E}} \quad (201)$$

In dieser Gleichung erscheinen die Grössen α , β und $f(n)$ in der Form

$$\frac{1}{f(n)} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}.$$

Es ist also noch zu zeigen, dass diese Grösse von der Netzanordnung und von l unabhängig ist.

Wollen wir die Grössen $f(n)$, α und β , sowie n_1 und l ermitteln, so ist für Quadrate als Netzelemente

$$l_1 = \varphi(nl) = nl = n \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s \xi) p \epsilon E}{C \alpha \beta \sigma \cos \varphi}} \quad (202)$$

Hier erscheinen die Werte n , α und β in der Verbindung

$$n \sqrt[4]{\frac{1}{\alpha \beta}}.$$

Auch dieser Wert ist, wie gezeigt werden soll, konstant. Ferner ist

$$n_1 = f(n) = 2 n^2 \quad (203)$$

Denn zwischen vier Speisepunkten liegen n^2 Quadrate, also kommen auf jeden Speisepunkt einseitig $\frac{n^2}{4}$ Quadrate mit n^2 Seiten, von denen aber jede Seite zwei Quadraten gleichzeitig angehört. Da sich in einem Kreuzungs- bzw. Speisepunkt vier Bezirke treffen, so gehören zu ihm viermal soviel Seiten, also

$$n_1 = 4 \frac{n^2}{2} = 2 n^2.$$

117.
Fortsetzung.
Quadratische Netzelemente.

Ferner ist die auf eine Polygonseite entfallende Leistung

$$c = \zeta i E = \frac{1}{2} \zeta l^2 \sigma, \quad (204)$$

denn auf einen Speisepunkt kommt die Fläche $4 \frac{n^2}{4} l^2$ Quadratmeter, also beträgt die Leistung, unter Berücksichtigung von Gleichung (203):

$$n^2 l^2 \sigma = n_1 i E = 2 n^2 i E,$$



Fig. 130.

woraus sich der Wert für c ergibt. Der Vergleich von (204) mit (197) ergibt $\beta = 0.5$ und wir erhalten für

1. $n = 1$ (Fig. 130), d. h. wenn die Seitenlänge l gleich oder nahezu gleich l_w ist, so dass jeder Kreuzungspunkt ein Speisepunkt wird:

$$f(n) = n_1 = 2$$

und nach Gleichung (XXIV) [64]:

$$q = 0.125 \frac{i l \varrho}{\epsilon};$$

daher:

$$V = 2 q l = 0.25 \frac{i l^2 \varrho}{\epsilon},$$

mithin:

$$\alpha = 0.25.$$

2. $n = 2$ (Fig. 131):

$$f(n) = n_1 = 8.$$

Jetzt verzweigen sich die Leitungen, sie können also entweder alle den gleichen Querschnitt erhalten oder zur Erzielung der geringsten Kupfermenge verschiedene Querschnitte, wobei entsprechend den praktischen Verhältnissen die unverzweigten Leiter durchgehend denselben Querschnitt beibehalten. Für den letzten Fall beschränken wir die Untersuchung auf die Annahme, dass die aufeinander folgenden Querschnitte sich wie 1 : 2 verhalten. Dann wird, wenn wir allgemein

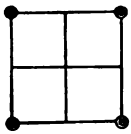


Fig. 131.

$$k_1 q_1 = k_2 q_2 = q$$

setzen (siehe das Beispiel [113], S. 200):

$$\epsilon_2 q = \frac{3 k_2}{2} i l \varrho; \quad \epsilon_1 q = \epsilon q = \left(\frac{3 k_2}{2} + \frac{k_1}{2} \right) i l \varrho.$$

Für $k_2 = k_1$ wird also:

$$V = 8 q l = 16 \frac{i l^2 \varrho}{\epsilon}; \quad \alpha = 16,$$

und für $k_2 = 1$, $k_1 = 2$, also für $q_2 = 2 q_1$:

$$V_{min} = (4 q_2 + 4 q_1) l = 15 \frac{i l^2 \varrho}{\epsilon}; \quad \alpha_{min} = 15.$$

Das theoretische Kupferminimum ergibt sich zu $14.9 \frac{i l^2 q}{\epsilon}$ für $q_2 = 1.72 q_1$.

3. $n = 3$ (Fig. 132):

$$f(n) = n_1 = 18.$$

$$\epsilon_2 q = 4 k_2 i l q; \quad \epsilon_1 q = (4 k_2 + k_1) i l q; \quad \epsilon q = (4 k_2 + 1.125 k_1) i l q.$$

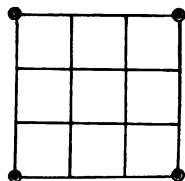


Fig. 132.

Für $q_2 = q_1$:

$$V = 92.25 \frac{i l^2 q}{\epsilon}; \quad \alpha = 92.25.$$

Für $q_2 = 2 q_1$:

$$V_{min} = 78.0 \frac{i l^2 q}{\epsilon}; \quad \alpha_{min} = 78.0.$$

Das theoretische Minimum wird zu $73.5 \frac{i l^2 q}{\epsilon}$ für $q_2 = 2.67 q_1$ erhalten.

4. $n = 4$ (Fig. 133).

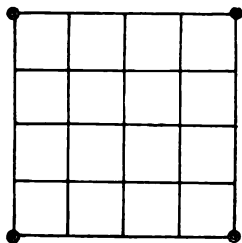


Fig. 133.

Entsprechend dem auf S. 200 berechneten Beispiel ist:

$$f(n) = n_1 = 32.$$

$$\epsilon_5 q = 7.5 k_3 i l q,$$

$$\epsilon_4 q = \frac{8.5 k_1 k_3 + 12 k_2 k_3 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q,$$

$$\epsilon_3 q = \frac{2.25 k_1 k_2 + 7.5 k_1 k_3 + 10.25 k_2 k_3 + 0.5 k_2^2 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q,$$

$$\epsilon_2 q = \frac{3.5 k_1 k_2 + 7.5 k_1 k_3 + 12 k_2 k_3 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q,$$

$$\epsilon_1 q = \epsilon q = \frac{4 k_1 k_2 + 8 k_1 k_3 + 12 k_2 k_3 + 0.5 k_1^2 + 7.5 k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3} i l q.$$

Für $q_3 = q_2 = q_1$ wird

$$\alpha = 341.3;$$

für $q_3 = 2 q_2 = 4 q_1$:

$$\alpha_{min} = 266.4.$$

5. $n = 5$ (Fig. 134).

$$f(n) = n_1 = 50.$$

$$\varepsilon_5 q = 12 k_3 i l Q.$$

$$\varepsilon_4 q = \frac{14 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l Q,$$

$$\varepsilon_3 q = \frac{4 k_1 k_2 + 12 k_1 k_3 + 34 k_2 k_3 + k_3^2 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l Q,$$

$$\varepsilon_2 q = \frac{7 k_1 k_2 + 12 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l Q,$$

$$\varepsilon_1 q = \frac{9 k_1 k_2 + 14 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + k_1^2 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l Q,$$

$$\varepsilon q = \frac{9 \cdot 25 k_1 k_2 + 14 \cdot 25 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + 1 \cdot 125 k_1^2 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l Q.$$

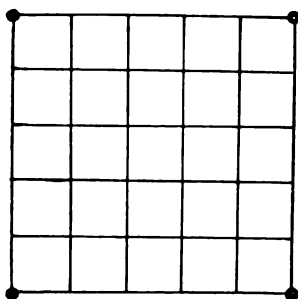


Fig. 134.

Für $q_3 = q_2 = q_1$ wird

$$\alpha = 905;$$

für $q_3 = 2q_2 = 4q_1$:

$$\alpha_{min} = 610.$$

Wir erhalten also für

$n = 1$	2	3	4	5
$\alpha_{min} = 0.25$	15.0	78.0	266.5	610.0
$\frac{1}{f(n)} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} = 0.354$	0.686	0.695	0.723	0.700
$n \sqrt{\frac{1}{\alpha \beta}} = 1.68$	1.21	1.20	1.18	1.19

Für $n > 1$, also für Netze mit Maschen bzw. Stromverzweigungen, sind in der That die beiden Zahlenreihen mit genügender Annäherung konstant, d. h. die günstigste Zahl der Speisepunkte bzw. ihre Entfernung ist von der Zahl der Maschen unabhängig. Dagegen weichen die Werte für $n = 1$, also für Netze, deren sämtliche Kreuzungspunkte Speisepunkte sind, wesentlich von den für Netze mit Maschen geltenden Zahlen ab. Bilden wir aus den Zahlenreihen unter $n = 2$ bis 5 die Mittelwerte, so können wir, unter Voraussetzung abgestufter Querschnitte an Stelle der Gleichungen (201) und (202) schreiben:

$$\left. \begin{aligned} N_r &= \begin{matrix} 0.35 \\ 0.70 \end{matrix} \right\} \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C \cos \varphi}{(l_s m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \\ l_{1r} &= \begin{matrix} 1.7 \\ 1.2 \end{matrix} \right\} \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{C \sigma \cos \varphi}} \end{aligned} \quad \quad (205)$$

Hierbei gelten die oberen Zahlenwerte für Netze ohne Verzweigung, die unteren für verzweigte Netze.

Für durchgehend gleiche Querschnitte ergibt sich ebenso:

$$\left. \begin{aligned} N &= 0.78 \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C \cos \varphi}{(l_s m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \\ l_1 &= 1.1 \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{C \sigma \cos \varphi}} \end{aligned} \right\} \quad (205a)$$

Die günstigste Zahl der Speisepunkte wird also, abgesehen von den Materialkonstanten, nur durch die Belastung (\mathfrak{E} , E , σ), den Spannungsverlust ($p\mathfrak{E}$) und die Länge der Speiseleiter (l_s) bestimmt. Sie wächst umgekehrt proportional mit der Betriebsspannung E , und bei konstanter Betriebsspannung umgekehrt proportional mit der Wurzel aus dem Spannungsverlust \mathfrak{E} ; sie nimmt ferner bei gleicher Netzfläche in geradem Verhältnis mit der Wurzel aus der Leistung des Netzes zu, da ja

$$\sqrt{\frac{\mathfrak{E}^3}{\sigma}} = \sqrt[3]{\mathfrak{E}^3},$$

oder auch mit der Wurzel aus der Belastungsdichte, da

$$\sqrt{\frac{\mathfrak{E}^3}{\sigma}} = \sqrt[3]{\sigma}.$$

Bei gleicher Belastungsdichte dagegen wächst N proportional mit \mathfrak{E} bzw. 0. Je grösser schliesslich die Entfernung der Centrale vom Netz (l_s), um so kleiner wird N_r . Entsprechend wächst die günstigste Entfernung der Speisepunkte mit der Wurzel aus der Betriebsspannung bzw. bei gleicher Spannung mit der vierten Wurzel aus dem Spannungsverlust und angenähert mit der vierten Wurzel aus l_s ; sie nimmt ab mit zunehmender Belastungsdichte, und zwar ebenfalls mit der vierten Wurzel.

Auch bei Zugrundelegung von gleichseitigen Dreiecken und Sechsecken als Netzelemente zeigt die Rechnung,¹⁾ dass die Grössen

$$\frac{1}{f(n)} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad \text{und} \quad n \sqrt[4]{\frac{1}{\alpha \beta}}$$

für verzweigte Netze praktisch konstant sind. Die entsprechenden Formeln lauten:

1) Siehe ETZ 1899, S. 809 ff.

Für gleichseitige Dreiecke bei abgestuften Querschnitten

$$\left. \begin{aligned} N_w &= \begin{matrix} 0.38 \\ 0.65 \end{matrix} \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C \cos \varphi}{(l, m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_{1w} &= \begin{matrix} 1.7 \\ 1.3 \end{matrix} \left\{ \sqrt[4]{\frac{(l, m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{C \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (206)$$

und bei durchgehend gleichen Querschnitten

$$\left. \begin{aligned} N &= 0.78 \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C \cos \varphi}{(l, m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_1 &= 1.2 \left\{ \sqrt[4]{\frac{(l, m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{C \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (206a)$$

Für Sechsecke bei abgestuften Querschnitten

$$\left. \begin{aligned} N_w &= \begin{matrix} 0.38 \\ 0.63 \end{matrix} \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C \cos \varphi}{(l, m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_{1w} &= \begin{matrix} 1.6 \\ 1.2 \end{matrix} \left\{ \sqrt[4]{\frac{(l, m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{C \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (207)$$

und bei durchgehend gleichen Querschnitten

$$\left. \begin{aligned} N &= 0.68 \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C \cos \varphi}{(l, m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_1 &= 1.1 \left\{ \sqrt[4]{\frac{(l, m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{C \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (207a)$$

119. Wie aus den Gleichungen (205) bis (207) ersichtlich ist, hängt die Zahl der Speisepunkte bzw. ihre Entfernung überhaupt nicht von der Form des Netzes ab, da die Konstanten sowohl für die verschiedenen betrachteten Netzelemente als auch für abgestufte und durchgehend gleiche Querschnitte nur unwesentliche Abweichungen zeigen. Auch Rechnungen SENGELS mit anderen Netzformen bestätigen dies Ergebnis. Bildet man daher aus allen zusammengehörigen Konstanten das Mittel, so folgt allgemein für alle Netze mit Luftleitungen:

Fortsetzung.
Die
günstigste
Zahl der
Speise-
punkte bei
Netzen ohne
Trans-
formatoren.

$$\left. \begin{aligned} N_w &= \begin{matrix} 0.37 \\ 0.71 \end{matrix} \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C \cos \varphi}{(l, m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_{1w} &= \begin{matrix} 1.7 \\ 1.2 \end{matrix} \left\{ \sqrt[4]{\frac{(l, m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{C \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (208)$$

oder wenn wir zur grösseren Bequemlichkeit die Konstante für verzweigte Netze auf 1.0 festsetzen und daher die entsprechenden Quotienten unter das Wurzelzeichen bringen:

$$\left. \begin{aligned} N_w &= \frac{0.5}{1.0} \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\xi} \cdot \sqrt{\frac{0.5 C \cos \varphi}{(l_s m + s/\xi) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_{1w} &= \frac{1.4}{1.0} \left\{ \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathfrak{E} E}{0.5 C \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \text{XXXIII}$$

wobei

$$C = \frac{\gamma c q}{1000}.$$

Ist das Netz unter der Erde verlegt, so können wir, wie wir bereits wissen [15], den Preis eines Meters Kabel in der Form $a + bq$ schreiben. Dagegen kostet ein Meter Freileitung vom Querschnitt q

$$\frac{\gamma c}{1000} q = \frac{C}{q} q \text{ Mark.}$$

An Stelle von C ist also nunmehr bq zu setzen, während die Konstante a zu m hinzuzufügen ist, da sie die Kosten ebenso beeinflusst, wie die Montagekosten, nämlich proportional zur Leitungslänge. Wir erhalten demnach für Kabelnetze ohne Transformatoren die Formeln:

$$\left. \begin{aligned} N_w &= \frac{0.5}{1.0} \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\xi} \sqrt{\frac{0.5 b q \cos \varphi}{[l_s(m+a) + s/\xi] \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_{1w} &= \frac{1.4}{1.0} \left\{ \sqrt[4]{\frac{[l_s(m+a) + s/\xi] p \mathfrak{E} E}{0.5 b q \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \text{XXXIV}$$

Ebenso wie m beziehen sich die Werte von a und b auf einen Leiter; sie können also der Tabelle II, S. 20, entnommen werden. Die Kosten der Kabelgräben sind ebenso wie die Kosten für das Leitungsgestänge bei Freileitungen unabhängig von der Zahl der Speisepunkte und treten daher in der Formel nicht auf. Ebenso wenig ändern sich die Gleichungen, wenn beide Strassenseiten mit Kabeln zu belegen sind, da ja der gesamte Kupferquerschnitt der gleiche bleibt wie bei einseitiger Verlegung.

Wird der Strom, wie gewöhnlich bei Wechsel- und Drehstromnetzen, transformiert, so treten an die Stelle der Speisepunkte die Transformatoren. Für das Hochspannungsnetz gelten die Formeln (XXXIII) und (XXXIV) unmittelbar; denn die Transformatoren beeinflussen die Kosten desselben ebenso wenig wie die Einzellasten die Kosten des Niederspannungsnetzes beeinflussen; sie werden unmittelbar oder durch kurze Verbindungsleitungen an die Hochspannungskabel angeschlossen. Dagegen sind die Kosten der Transformatoren mit Einschluss der Kosten der eben erwähnten Verbindungsleitungen, der Transformatorstationen und ihrer Aufstellung für das Niederspannungsnetz zu berücksichtigen, da sie ja die Speiseleitungen und Speisekästen ersetzen.

Den Preis eines Transformators kann man nun gleichfalls mit grosser Annäherung in der Form $f + g\mathfrak{A}$ schreiben, wenn \mathfrak{A} die Leistung des Transformators in KW, f und g Konstanten sind. Die Montagekosten des Transformators, einschliesslich der Transformatorstation und Schaltanlage, sind von der Grösse desselben ziemlich unabhängig und seien mit h bezeichnet. Das Produkt $N \frac{f+h+g\mathfrak{A}}{\xi}$ tritt also an die Stelle der ersten drei Summanden der Gleichung (199) [116] für die Netzkosten K , und da $Ng\mathfrak{A} = g\mathfrak{E}$ unter den für den Preis der Transformatoren gemachten Voraussetzungen von der

120.
Fortsetzung.
Netze mit
Transformatoren.

Zahl der Transformatoren, also von N bzw. l_1 unabhängig ist, mithin bei der Differentiation verschwindet, so ist in den Gleichungen (XXXIII) und (XXXIV) $\frac{f+h}{\xi}$ anstatt $l_s m + s/\xi$ bzw. $l_s(m+a) + s/\xi$ einzusetzen. Wir erhalten also:

$$\left. \begin{aligned} N_{ir} &= \frac{0.5}{1.0} \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\xi} \sqrt{\frac{0.5 \xi C \cos \varphi^{-1}}{(f+h) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_{1ir} &= \frac{1.4}{1.0} \left\{ \sqrt{\frac{(f+h) p \mathfrak{E} E}{0.5 \xi C \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \dots \quad (\text{XXXV})$$

für Freileitungen mit Transformatoren, und

$$\left. \begin{aligned} N_{ir} &= \frac{0.5}{1.0} \left\{ \frac{\mathfrak{E}}{\xi} \sqrt{\frac{0.5 \xi b q \cos \varphi^{-1}}{(f+h) \sigma p \mathfrak{E} E}} \right\} \\ l_{1ir} &= \frac{1.4}{1.0} \left\{ \sqrt{\frac{(f+h) p \mathfrak{E} E}{0.5 \xi b q \sigma \cos \varphi}} \right\} \end{aligned} \right\} \dots \quad (\text{XXXVI})$$

für unterirdisch verlegte Kabel mit Transformatoren.

Die Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) beziehen sich sämtlich auf einen Leiter und gelten, wie bereits hervorgehoben, sowohl für Wechsel- als Drehstrom (bzw. Gleichstrom), für Zwei- und Mehrleiteranlagen. Bei Gleichstrom ist

$$\cos \varphi = 1, \quad \xi = 2, \quad \zeta = 1, \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{2} E;$$

bei Wechselstrom

$$\xi = 2, \quad \zeta = \cos \varphi, \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{2} E$$

und bei Drehstrom

$$\xi = 3, \quad \zeta = \sqrt{3} \cos \varphi \quad \text{und} \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{3} E$$

zu setzen. Bei Mehrleitersystemen ist unter E die Spannung zwischen den Aussenleitern zu verstehen.

Werden die Speiseleitungen von einem Sammel-Speisekasten abgezweigt, der seinerseits durch eine einzige Sammelleitung mit der Centrale verbunden ist, so ist für l_s , wie leicht einzusehen, die Entfernung der Speisepunkte von dem gemeinsamen Verzweigungspunkt einzusetzen.

Soll die Leitung nicht für einen gegebenen Spannungsabfall

$$\frac{\mathfrak{E}}{\cos \varphi} = \frac{p \mathfrak{E}}{\cos \varphi},$$

sondern für einen gegebenen Energieverlust $p' \mathfrak{E}$ berechnet werden, so dass in der gesamten Leitung (2l bzw. 3l) diese Energie verloren geht, so wird bei Wechselstrom (bei Gleichstrom ist stets $p' = p$):

1) Diese Formeln geben für N bzw. l_1 bei Wechselstromdreileiter- und bei Drehstromanlagen andere Werte als die von SENDEL entwickelten, und zwar ist im ersten

Falle die Zahl N der Speisepunkte im Verhältnis von $\sqrt{\frac{5}{4} \cdot \frac{1}{\cos \varphi}}$ kleiner, weil wir $\frac{\mathfrak{E}}{\cos \varphi}$ als Spannungsabfall eingeführt haben und zufolge der entwickelten Begründung den Mittelleiter nicht in Rechnung setzen; im zweiten Falle ist N im Verhältnis von $\sqrt{\frac{3}{1}}$ kleiner.

$$p' \mathcal{E} = p' i E \cos \varphi = 2 p' i \mathcal{E} \cos \varphi = \frac{2 p' i \mathcal{E} \cos^2 \varphi}{\cos \varphi},$$

und bei Drehstrom:

$$p' \mathcal{E} = p' \sqrt{3} i E \cos \varphi = 3 p' i \mathcal{E} \cos \varphi = \frac{3 p' i \mathcal{E} \cos^2 \varphi}{\cos \varphi}.$$

Bei gegebenem $\frac{\mathcal{E}}{\cos \varphi}$ ist dagegen der Energieverlust wegen der Phasengleichheit von Strom und Spannungsabfall:

$$\frac{2 i \mathcal{E}}{\cos \varphi} = \frac{2 p i \mathcal{E}}{\cos \varphi} \quad \text{bzw.} \quad \frac{3 i \mathcal{E}}{\cos \varphi} = \frac{3 p i \mathcal{E}}{\cos \varphi}.$$

Es tritt also bei Berechnung auf gegebenen prozentualen Energieverlust $p' \mathcal{E}$ an die Stelle von p in den Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) die Grösse $p' \cos^2 \varphi$. Und andererseits ist bei gegebenem prozentualen Spannungsverlust $p = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}}$ der prozentuale Energieverlust gleich $\frac{p}{\cos^2 \varphi}$.

Die Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) können natürlich nicht zum Vergleich der Kosten von Netzen verschiedener Stromarten (Gleich-, Wechsel-, Drehstrom) oder verschiedener Anordnung (Zwei- oder Mehrleiter) dienen, da sie nur behufs Ermittlung der günstigsten Speisepunktzahl für eine bestimmte Stromart entwickelt sind. Der Vergleich der Kosten von Netzen verschiedener Anordnung und Stromart ist einem späteren Abschnitt [144 ff.] vorbehalten.

Die Anwendung der Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) wird sich für beliebige Netzformen am zweckmässigsten so gestalten, dass die günstigste Anzahl der Speisepunkte berechnet wird, da es leichter ist, eine gegebene Zahl von Speisepunkten im Netz zu verteilen. Eine Nachprüfung der nach Gutdünken verteilten Bezirke [113] ermöglicht, die günstigste Lage der Speisepunkte zu bestimmen. In der Regel werden die Netze zwischen den Speisepunkten Maschen bilden, so dass gewöhnlich mit dem Zahlenkoeffizient 1.0 gerechnet werden kann.

121.
Fortsetzung.
Be-
merkungen
zur An-
wendung der
Formeln.

Da l_s und σ im allgemeinen sich von Punkt zu Punkt ändern, so wird man bei grosser Ausdehnung das gesamte Netz in mehrere Bezirke teilen, in denen diese beiden Grössen möglichst konstant sind. Bei Bestimmung des Wertes von σ ist zu beachten, dass die (im allgemeinen im Interesse des Ausgleichs zu vermeidenden) unmittelbaren Belastungen von Speisepunkten zur Netzbelastung nichts beitragen, also für σ nicht in Frage kommen. Die Summe aller für die einzelnen Bezirke erhaltenen, im allgemeinen gebrochenen Zahlenwerte ergibt die günstigste Zahl der Speisepunkte, die auf die nächstliegende ganze Zahl abzurunden ist.

Wir wollen nun die Anwendung der Formeln in einem grösseren Netz verfolgen, das in Fig. 135 im Massstab von 1:16667 dargestellt ist. Die den Verteilungsleitungen beigelegten Zahlen bedeuten den gleichzeitigen Verbrauch in KW, der auf die Strecken gleichmässig verteilt sein soll. Die umkreisten Zahlen bedeuten den Verbrauch grösserer Einzelabnehmer. Die Centrale ist vom Punkt f nach links etwa 200 m entfernt.

Beispiel.

Die Berechnung werde zunächst für eine Gleichstrom-Dreileiteranlage von 2×110 Volt Nutzspannung durchgeführt; die Kabelanlage ist in der Erde verlegt. Der Spannungsverlust soll 1.5% betragen, also wird

$$p = 0.015, \quad \cos \varphi = 1, \quad \zeta = 1, \quad \xi = 2 \quad \text{und} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} E.$$

Für eisenbandarmierte Einfach-Gleichstromkabel ergibt die Tabelle II, S. 20, bei einem Kupferpreis von 75 £

$$a = 0.80, \quad b = 0.028.$$

Die Montagekosten für den laufenden Meter Kabel betragen

$$m = 0.40 \text{ Mark},$$

ohne Kabelgraben u. s. w., die Kosten für den Anschluss einer Speiseleitung im Netz und in der Centrale mögen sich auf

$$s = 200 \text{ Mark}$$

belaufen. Der spezifische Widerstand des Kupfers sei

$$\varrho = 0.018.$$

■

Fig. 135.

Zur Berechnung von l_n und σ werde das Netz in sechs Bezirke A bis F eingeteilt, die zu folgenden Zahlen führen:

Bezirk	A	B	C	D	E	F
Verbrauch \mathcal{E} in Watt	113000	52000	70000	131000	61000	108000
Oberfläche Q in m^2	150000	120000	240000	165000	180000	145000
$\sigma = \frac{\mathcal{E}}{Q}$	0.75	0.43	0.29	0.80	0.34	0.71
Länge der Speise- leitung in m	1150	750	1050	400	1300	750.

Die Gleichungen (XXXIV) ergeben daher folgende Werte:

Bezirk	A	B	C	D	E	F
N_n	2.83	2.09	2.94	5.07	2.14	3.22
l_{1n}	230	240	290	180	290	210.

Die Summe der Speisepunkte ergibt die Gesamtzahl 18.29, also 18. Die Verteilung derselben geht aus der Fig. 135 hervor.

Bei der Grösse und der geschlossenen Form des Netzes ist auf Ausgleich keine besondere Rücksicht zu nehmen. Es wurde daher die Belastung der grösseren Verbrauchsstellen a , b und c nicht in die entsprechenden Zahlen für \mathfrak{E} einbezogen, weil sich im Interesse möglichst geringer Kosten des Verteilungsnetzes die Anlage von Speisepunkten an diesen Stellen starken Verbrauchs empfiehlt. Die Verteilung der Speisepunkte liess sich auch zwanglos unter Benutzung der Punkte a , b und c vollziehen.

Eine zweite Berechnung des Netzes soll unter Voraussetzung von hochgespanntem einphasigen Wechselstrom erfolgen. Die Spannung des Primärnetzes sei zu 2000 Volt, die des Sekundärnetzes wieder zu 2×110 Volt angenommen, das letztere soll also wieder als Dreileiteranlage ausgeführt werden. Der maximale Spannungsverlust betrage ebenfalls $100 p\%$, so dass der Spannungsabfall in den Verteilungsleitern $\frac{p}{\cos \varphi} \mathfrak{E}$ Volt ist. Der mittlere Leistungsfaktor sei zu $\cos \varphi = 0.9$ angenommen. Für dreifach konzentrische Verteilungskabel (Querschnitt des Mittelleiters gleich der Hälfte desjenigen der Aussenleiter) erhalten wir die Faktoren a und b bezogen auf einen Aussenleiter zu $a = 0.85$, $b = 0.027$ (Tabelle II). Die Kosten eines einphasigen Wechselstrom-Transformators können im Mittel zu $300 + 45 \mathfrak{A}$ angesetzt werden (für Drehstrom-Transformatoren entsprechend $400 + 55 \mathfrak{A}$). Die Herstellung einer Transformatorenstation, einschliesslich der Schaltanlage, verursache eine Ausgabe von 1100 Mark, für den Anschluss einer Transformatorenstation an das primäre Netz mögen im Mittel 400 Mark in Ansatz gebracht werden, so dass $f + h = 1800$ Mark wird. Die Einteilung des Netzes in sechs Bezirke behalten wir bei und vernachlässigen wieder den Verbrauch der Belastungsstellen a , b und c bei der Ermittlung von \mathfrak{E} , da deren Grösse die Aufstellung besonderer Transformatoren rechtfertigt und empfiehlt.

Hier ist also

$$p = 0.015, \quad \zeta = \cos \varphi = 0.90, \quad \xi = 2 \quad \text{und} \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{2} E;$$

daher wird nach Gleichung (XXXVI):

für den Bezirk	A	B	C	D	E	F
N_w	3.75	2.28	3.74	4.21	3.01	3.51
l_{1w}	210	240	270	210	260	210.

Die Gesamtzahl der Transformatoren ist $20.5 : 21$, ihre Verteilung ist in Fig. 136 dargestellt.

Für das Hochspannungsnetz haben wir $E = 2000$ Volt angenommen. Da wir mit einer Ringleitung auskommen, so haben wir das ganze Speisegebiet als einen Netzbezirk zu behandeln, dessen Schwerpunkt von der Centrale $l_s = 650$ m entfernt ist. Stromverzweigungen sind jetzt nicht vorhanden, also gelten die oberen Zahlenfaktoren der Formeln. Als Spannungsverlust setzen wir $\varepsilon = 0.01 \mathfrak{E}$ fest, der primäre Leistungsfaktor sei

$$\cos \varphi = 0.85.$$

Die primäre Leistung erhalten wir aus der bisher in der Rechnung berücksichtigten Belastung von 530000 Watt vermehrt um die Belastungen a , b und c unter Zugrundelegung eines Verlustes von

$$\frac{p}{\cos^2 \varphi} = \frac{0.015}{0.9^2} = 0.02$$

im Sekundärnetz, 0.05 in den Transformatoren und

$$\frac{0.01}{0.85^2} = 0.014$$

im Primärnetz zu $\mathcal{E} = 630000$ Watt; die ganze Oberfläche des Netzes beträgt $0 = 1000000$ Quadratmeter, also ist $\sigma = 0.63$. Für verseilte Zweileiter-Hochspannungskabel (bis 3000 Volt) ergibt die Tabelle II die Zahlen $a = 1.30$, $b = 0.041$; ferner koste die Verlegung eines Meters des Doppelkabels 0.60 Mark, so wird, bezogen auf einen Leiter, $m = 0.30$. Die Kosten des Anschlusses einer Hochspannungs-Speiseleitung in der Centrale und in

$$\begin{array}{c} | \\ / \quad \backslash \end{array}$$

Fig. 136.

der Transformatorenstation des Netzes seien mit $s = 500$ Mark in Rechnung gebracht. Da hier schliesslich wieder

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} E \quad \text{und} \quad \xi = 2,$$

ferner

$$\zeta = \cos \varphi = 0.85 \quad \text{und} \quad p = 0.01$$

zu setzen ist, so ergibt die Formel (XXXIV) mit den Faktoren für unverzweigte Netze die Zahlen

$$N_w = 1.65 \cdot 2 \quad \text{und} \quad l_{1w} = 840.$$

Am geeignetsten für die Unterbringung der Hochspannungs-Verteilungsschalttafeln erscheinen die Transformatorenstationen II und XV (in der Fig. 136 durch Doppelkreise hervorgehoben), so dass das Primärnetz die durch gestrichelte Linien angedeutete Form erhält. Zur Vermeidung von

123.
Sammel-
leitungen.

Laufen zwei oder mehr Speiseleiter auf grössere Strecken einander parallel, so fasst man sie gern zu einer sogenannten Sammelleitung zusammen (vgl. Fig. 119, S. 174), da, wie bereits erwähnt [100], eine dickere Leitung in den Anschaffungs- und Verlegungskosten, sowie besonders auch für den Ausgleich günstiger ist, als mehrere dünne Leiter. Dagegen hat man allerdings den Nachteil eines grösseren Störungsgebietes für den Fall eines Fehlers in der Sammelleitung in den Kauf zu nehmen. Besonders bei Hochspannungsnetzen, deren Energiequelle weit vom Gebrauchsort entfernt ist, wird man gern die sämtlichen Speiseleitungen zu einer oder, wenn deren Querschnitt zu gross werden sollte, bezw. wenn man für den Fall einer Störung eine Reserve vorsehen will, zu zwei Sammelleitungen zusammenfassen.

Die Frage, wie der gesamte Spannungsverlust ε_s auf den verzweigten und unverzweigten Teil der Leitung zu verteilen sei, haben wir bereits gelegentlich der Berechnung verzweigter offener Leiter erledigt [42 ff.]. Von den dort gegebenen drei Lösungen werden wir hier natürlich diejenige auf günstigstes Kupfervolumen wählen, wir haben also die Gleichung (45) [43] anzuwenden.

124.
Teilung der
Speiseleiter.

Den Gegensatz zur Zusammenfassung mehrerer Speiseleiter zu einem bildet die Teilung eines dicken Speiseleiters in zwei oder mehrere parallel geschaltete dünnere Stränge. Bringt das erste Verfahren bei langen Leitungen Vorteil, deren Belastung infolge des beschränkten Spannungsverlustes auch bei grösseren Querschnitten nicht leicht über die feuersichere Stromdichte steigt, so ist die Teilung der Leiter bei kurzen Speiseleitungen am Platz. Hier kann es nämlich leicht vorkommen, dass der wirtschaftliche Spannungsverlust nicht ausgenutzt werden kann, weil die Stromdichte zu gross wird. Wie aber die Tabelle I, S. 6, zeigt, können dünne Querschnitte spezifisch stärker beansprucht werden als dicke. Wählt man also anstatt einer dicken zwei oder mehrere dünnere Leitungen, so lässt sich häufig ein Vorschaltwiderstand vermeiden.

Diese Teilung der Leitung in mehrere parallele Leiter kann man nach einem Vorschlage von MÜLLENDORFF¹⁾ zugleich dazu benutzen, um den Ausgleich eines Netzes zu verbessern, bezw. um die Kosten der Ausgleichsleiter eines Netzes zu verringern. Wie wir [96] gesehen haben, entsteht bei veränderlicher Netzbelastung der Spannungsunterschied ε_{MN} an zwei Speisepunkten dadurch, dass die eine Speiseleitung einen verhältnismässig grösseren Strom führt, als die andere, so dass der Spannungsverlust

$$\eta_M \varepsilon_s > \eta_N \varepsilon_s$$

wird. Erhöht man nun den Widerstand der den geringeren Strom führenden Leitung durch Abschalten eines oder mehrerer Teilleiter, so gleicht sich der Spannungsverlust in den beiden Speiseleitungen mehr oder weniger aus und die den Querschnitt der Ausgleichsleitung beeinflussende Grösse $\bar{\varepsilon}_{MN}$ wird kleiner. Natürlich müssen stets der positive und der negative Teilleiter gleichzeitig abgeschaltet werden. Für kleine Centralen, bei denen naturgemäss die Belastungsverschiedenheiten grösser werden und oft stark ins Gewicht fallen, sind mit diesem Regelungsverfahren auf einfachem und billigem Wege gute Erfolge zu erzielen.

1) E. MÜLLENDORFF: Ein neues Verfahren zur Spannungsregelung in Verteilungsnetzen. ETZ 1904, S. 871.

1000 m und darüber steigen. Diesen Zahlen ordnen sich die in dem berechneten Beispiele (S. 213 ff.) gefundenen gut ein.

Das eigentliche Netz war von den beiden eben erwähnten Bestandteilen der Anlage insofern ganz unabhängig, als seine örtliche Ausdehnung und Form von vornherein durch die Lage der Abnehmer gegeben ist. Die an den Strassenecken sich kreuzenden Kabel werden in Verteilungs-, bzw. wenn an die betreffende Ecke ein Speisepunkt fällt, in Speisekästen vereinigt, in denen sie durch Sicherungen gegen zu grosse Erwärmung geschützt werden. Diese dienen zugleich zum Abschalten von Kabelstrecken, etwa wenn Messungen oder Reparaturen an ihnen vorgenommen werden sollen. In geschäftsreichen Strassen, die starke Belastungen ergeben, werden beide Seiten mit Kabelzügen belegt, wie man überhaupt von dieser Massnahme Gebrauch machen wird, sobald überschlägliche Rechnungen zeigen, dass die Verlegung zweier Kabel vom halben Querschnitt billiger ist, als die zum Anschluss der auf der anderen Strassenseite zu erwartenden Abnehmer nötigen Hausanschlussleitungen. Querschnitte von über 500 mm² in unterirdischen Kabelanlagen und über 50 mm² in Luftleitungsnetzen sind möglichst zu vermeiden, solche von über 1000 bzw. 100 mm² sind unter allen Umständen praktisch unbrauchbar, da sie so steif bzw. (die blanken Kabel) so schwer werden, dass sie nicht mehr verlegt werden können. Nach unten hin bilden die äussersten Grenzen 25 mm² für Kabelnetze, 10 mm² für Luftleitungsnetze, doch geht man in Kabelnetzen nicht gern unter 35 mm².

Im allgemeinen wird man es vermeiden, bei der Belastung der Kabel bis an die Grenze der Feuersicherheit zu gehen, da die Leiter auch dann sich nicht erwärmen, bzw. ihre Sicherungen auch dann nicht abschmelzen sollen, wenn sie infolge einer Betriebsstörung die Belastung einer Nachbarleitung mit übernehmen müssen, oder in Verteilungsnetzen die Stromzuführung anstatt von beiden nur von einer Seite her erfolgen kann.

Für den maximalen Spannungsverlust im Verteilungsnetz hatten wir [5] die Grösse 0.03 ϵ gefunden, die auf das eigentliche Verteilungsnetz und auf die Anschlüsse zu verteilen ist. Gewöhnlich bemisst man den Verlust im Netz auf 2 % und rechnet ebenso viel auf die Anschlüsse und Hausinstallationen. Die Praxis hat gezeigt, dass ein Verlust von insgesamt 4 % durchaus zulässig ist, dass also die Glühlampen dabei einwandsfrei brennen. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass die Spannungsschwankungen eines Netzes zeitlich sehr langsam verlaufen, da die Schalteinheiten im Vergleich zur Belastung der die Verluste verursachenden Kabel fast ausnahmslos gering sind, bzw. durch entsprechende Vorschriften der Centralen gering gehalten werden.

Der Spannungsverlust in den Speisekabeln wird so hoch genommen, als es die Rücksichten auf Wirtschaftlichkeit und Ausgleich zulassen. Ausgeführte Netze zeigen im Mittel einen Verlust von 10 %; die Grenzen sind etwa 6 und 15 %, doch finden sich in Ausnahmefällen Verluste bis zu 20 %.

In Centralen-Netzen kommt es wohl nie vor, dass alle Energieverbraucher, also Lampen und Motoren, zugleich im Betrieb sind. Das Verhältnis der im Augenblick des grössten Verbrauches zugleich im Betrieb befindlichen Belastung zum gesamten Anschlussäquivalent heisst der „Belastungsfaktor“. Er liegt je nach der Grösse und Belastungsart der Netze zwischen 0.4 und 0.7 und ist bei reinen Beleuchtungsanlagen und kleinen Netzen grösser als bei gemischten Betrieben und grossen Netzen. Für verschiedene Netzteile muss

er ebenfalls verschieden gross angenommen werden; er wird um so grösser ausfallen, je mehr die angeschlossenen Verbraucher der gleichen Verbrauchskategorie angehören. Ist also das Netz für eine gegebene Anzahl anzuschliessender Energieverbraucher zu berechnen, so wird man diesem Umstande entweder dadurch Rechnung tragen, dass man sie in entsprechendem Verhältnis vermindert oder — bequemer — den maximalen Spannungsverlust erhöht.¹⁾

Nicht selten tritt der Fall ein, dass man behufs Feststellung der ungefähren Kosten genötigt ist, eine Überslagsberechnung anzustellen, ohne Angaben für die Belastung zu besitzen. Man ist dann gezwungen, sich der Erfahrungszahlen zu bedienen, die die Statistik für ähnliche bestehende Werke giebt. Wiewohl solche Zahlen stets mit äusserster Vorsicht zu gebrauchen sind, seien einige Tabellen, die von Nutzen sein können, im folgenden nach den Zusammenstellungen von HOPPE,²⁾ sowie von E. v. MILLER³⁾ über Anschlusszahlen und Anlagekosten neuerer Centralen wiedergegeben.

Tabelle X.

Anschlusszahlen neuerer Centralen bezogen auf 1000 Einwohner (HOPPE).

Einwohner-Zahlen	Anschlusszahlen in KW		
	Beleuchtung	Mech. Energie	Gesamt
unter 10 000	27	14·6	41·6
10 000 bis 50 000	13·9	9·1	23·0
50 000 bis 150 000	11·9	6·3	18·2

Tabelle XI.

Anlagekapital von Centralen (in Mark; HOPPE).

Einwohner-Zahlen	Gesamt-Anlagekapital		Grundstück u. Bauten		Maschinen und Kessel mit Zubehör für 1 P S	Akkumulatoren für 1 KW	Netz für	
	für 1 KW	für 1000 Einw.	für 1 m² Heizfläche	für 1 P S Leistung			1 KW	1000 Einw.
unter 10 000	1860	45 000	560	410	710	425	300	12 800
10 000 bis 50 000	1339	23 000	284	157	400	372	320	6 900
50 000 bis 150 000	1492	—	—	—	—	—	—	—

Verhältnis der Anlagekosten des Leitungsnetzes zu den Gesamtanlagekosten

1 : 3 bzw. 1 : 3·6.

1) Über die Berücksichtigung des Belastungsfaktors bei der Wahl der Maschineneinheiten siehe NORBERG-SCHULZ: Der Belastungsfaktor elektrischer Beleuchtungscentralen. ETZ 1905, S. 919.

2) FRITZ HOPPE, Was lehren die Statistiken . . . Darmstadt.

3) E. v. MILLER, Die Versorgung der Städte mit Elektrizität . . . Darmstadt 1896. Hier finden sich auch Winke für die Erhebung der Anschlusszahlen für neu zu errichtende Centralen.

Tabelle XII.

Anschlusszahlen für Strassen- und Privatbeleuchtung
(v. MILLER).

	Für 100 m Strassenlänge	Für 1000 Einwohner
Elektrische Strassenbeleuchtung		
Glühlampen	2·5 bis 4	—
Bogenlampen	1 bis 2	—
Privatbeleuchtung		
Glühlampen zu 16 HK . . .	30 bis 90	100 bis 400
Mechanische Energie		
PS zu 900 Watt	—	2 bis 10

127.
Erweiterung
der Netze.

Wie die Erfahrung lehrt, nimmt das Bedürfnis für Licht und Energie in den elektrischen Centralen von Jahr zu Jahr zu. Man trägt dieser Tatsache vielfach schon bei der Ausarbeitung der Kostenanschläge Rechnung, indem man von vornherein sowohl die Centrale als das Netz für eine entsprechend grössere Leistung entwirft. Von diesem Entwurf wird dann im „ersten Ausbau“ zunächst nur ein Teil ausgeführt, der die Bedürfnisse der ersten Jahre deckt, während die übrigen Teile, vielleicht auf Grund der im Betrieb gesammelten Erfahrungen oder technischer Fortschritte modifiziert, einem „zweiten Ausbau“ vorbehalten bleiben. In einem solchen Falle wird das Netz für die grösste in Aussicht genommene Belastung berechnet. Dem zunächst zu verlegenden Teil des Netzes werden diejenigen Querschnitte gegeben, die dieser Berechnung entsprechen, auch wenn im Anfang die Belastung eine geringere sein sollte und mit dünneren Leitungen befriedigt werden könnte. Man erreicht dadurch, dass man bei steigender Belastung und Ausdehnung des Netzes die einmal verlegten Leitungen nicht zu verstärken oder auszuwechseln braucht (wodurch sie stets entwertet werden), dass man also einerseits Verluste für die Zukunft vermeidet, andererseits ohne den organischen Zusammenhang des Netzes zu stören, neu eintretenden Bedarf sofort befriedigen kann.

Um Anhaltspunkte für die Zunahme der Anschlusswerte grosser und kleiner Centralen zu geben, seien einige der Statistik entnommene Zahlen angeführt.

Tabelle XIII.

Zunahme des Anschlusswertes der Berliner
Centralen (KW).

Jahr	1886	1891	1896	1900	1904
Licht	645	5 333	12 975	21 122	36 195
Energie (ohne Bahnbetrieb)	—	288	4 633	22 037	44 448

Tabelle XIV.

Zunahme der Anschlusswerte in grossen Städten (KW).

Jahr . . .	1888	1890	1894	1904
Barmen . .	86	270	470	2290
Düsseldorf .	(1891)	580	960	5730
Elberfeld .	"	490	600	4610
Hannover .	"	580	920	5610
Mühlhausen	"	450	670	2690
Stettin . .	"	310	720	4550
Kassel . .	(1892)	210	320	1560
Köln . . .	"	540	1150	6830

Tabelle XV.

Zunahme des Anschlusses in kleinen Städten (KW).

Mittel aus vier Betrieben (HOPPE).

Betriebsjahr	1	2	3	4
Anschlusswert bezogen auf 1000 Einwohner	2·8	5·6	6·9	8·0

Die Mehrleitersysteme.

128.
Anwen-
dungsgebiet
des Mehr-
leiter-
systems.

Alle unsere bisherigen Betrachtungen über die Bestimmung der Strom- und Spannungsverteilung und die Bemessung der Querschnitte bezogen sich ausschliesslich auf Zweileiternetze, wenn auch hin und wieder im Text auf Mehrleiteranlagen Bezug genommen worden ist. Im Laufe der Untersuchung war bereits mehrfach der Einfluss der Spannung auf die Kosten des Netzes hervorgetreten; wir haben gefunden, dass, besonders bei räumlich stark ausgedehnten Speisegebieten, die Spannung möglichst hoch genommen werden musste, sollten die Herstellungskosten des Netzes nicht einen Betrag erreichen, dass die Anlage Gefahr lief, unrentabel zu werden. Ebenso aber haben wir gefunden, dass die Höhe der Netzspannung durch die Spannung der Energieverbraucher begrenzt ist, und zwar lag diese Grenze bei Bogenlampen in der Gegend von etwa 50, für Glühlampen zunächst bei etwa 110, später bei 220 Volt¹⁾ [34]. Da jedoch dieser Spannungsbereich bei ausgedehnten Verteilungsgebieten nicht mehr genügte, so musste man auf Mittel bedacht sein, ihn noch mehr zu erweitern.

Hier bot nun die Reihenschaltung der Verbraucher einen Ausweg, der aber nicht ohne weiteres gangbar war, falls eine vollständige Unabhängigkeit der Verbrauchsapparate voneinander zur Bedingung gemacht wurde. Erst die Mehrleitersysteme, von denen das Drei- und das Fünfleitersystem praktische Bedeutung erlangt haben, lösten das gestellte Problem zur Zufriedenheit.

Es ist nunmehr unsere Aufgabe zu zeigen, worin sich die Berechnung der Mehrleitersysteme von derjenigen des Zweileitersystems unterscheidet, bzw. wie die Berechnung der ersteren auf die des letzteren zurückgeführt wird.

Das Dreileitersystem.

129.
Entstehung
des
Dreileiter-
systems und
Bezeich-
nungen.

Schalten wir zwei vollständige elastische Zweileiter-Parallelschaltungsanlagen, deren Spannung E_2 ist, in Reihe, so dass also der negative Pol der einen Maschine mit dem positiven der anderen, die (negative) Rückleitung

1) Über die Vor- und Nachteile der 110 und 220 Voltspannung in Centralen vgl. E. WIKANDER: Die Wahl der Verbrauchsspannung für neu anzulegende Elektrizitätswerke. ETZ 1905, S. 947.

der ersten Anlage mit der (positiven) Hinleitung der zweiten vereinigt werden (Fig. 137), so entsteht das Dreileitersystem.¹⁾ Die beiden äusseren Leiter heissen die Aussenleiter, und zwar der positive und negative Aussenleiter, der mittlere Leiter wird der neutrale, Mittel-, Ausgleichs- oder Nullleiter des Systems genannt. Wo eine Unterscheidung nötig erscheint, bezeichnen wir

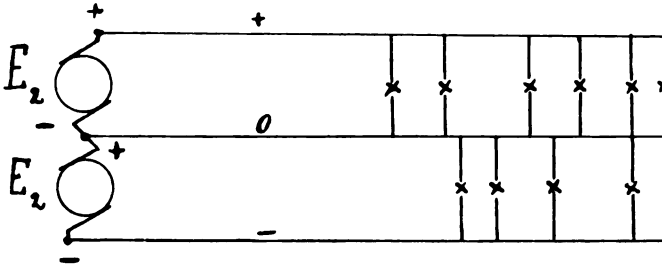


Fig. 137.

die Grössen der positiven Leitung ausser ihren Indizes mit vorgesetztem Index p , die der negativen mit n und diejenigen der Nullleitung mit 0. Die Gesamtspannung des Systems ist

$$E = 2 E_2 = 2 \mathcal{E},$$

die Spannung gegen Null

$$\mathcal{E} = E_2.$$

Die Betrachtung der Fig. 137 lehrt unmittelbar, dass beide Hälften des Systems voneinander unabhängig sind. Jede Lampe kann einzeln ein- oder ausgeschaltet werden, ohne eine andere in Mitleidenschaft zu ziehen, im Gegensatz zur gewöhnlichen Reihenschaltung zweier Lampenreihen (Fig. 138),

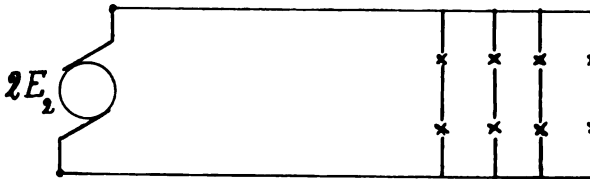


Fig. 138.

bei der durch die Ausschaltung einer Lampe zugleich die Ausserbetriebsetzung einer zweiten Lampe veranlasst wird, da ihrem Strom keine Rückleitung zur Stromquelle zur Verfügung steht.

Wie aus der Entstehung des Dreileitersystems aus zwei getrennten Zweileitersystemen unmittelbar gefolgert werden kann, unterscheidet sich die Stromverteilung der beiden Aussenleiter in nichts von derjenigen des positiven bzw. negativen Leiters der entsprechenden als unabhängiger Zweileiter gedachten Systemhälfte: der Strom ist in jedem Teile des Leiters gleich der Summe der nachfolgenden Abzweigungen:

$$J_{p,v-1,v} = \sum_v^n i_{pv}; \quad J_{n,v-1,v} = \sum_v^n i_{nv}$$

1) Das Dreileitersystem ist von J. HOPKINSON angegeben worden, D. R.-P. No. 25205 vom 22. Februar 1883.

(Fig. 139). Der Strom im Nullleiter dagegen entsteht durch Überlagerung der beiden Aussenleiterströme, da ja in den getrennten Zweileitersystemen der negative und positive Leiter gleiche Ströme führen. Es ist also unter Beachtung der Vorzeichen:

$$J_{001} = -J_{p01} + J_{n01} = -(J_{p01} - J_{n01})$$

$$J_{012} = -(J_{p12} - J_{n01})$$

$$J_{01'2} = -(J_{p12} - J_{n12}) \text{ u. s. w.}$$

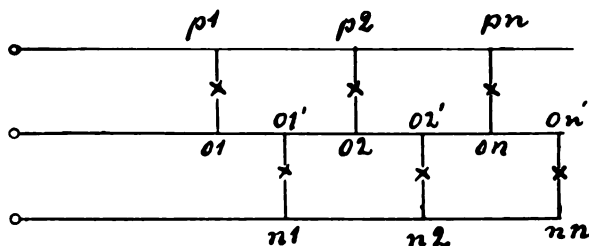


Fig. 139.

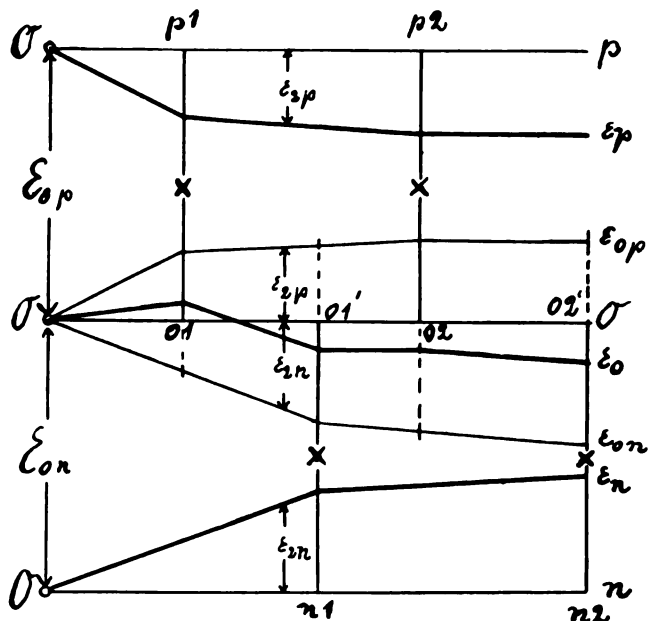


Fig. 140.

In Worten: Der Strom im Nullleiter ist gleich der negativen Differenz der entsprechenden positiven und negativen Aussenleiterströme. In seinen verschiedenen Teilen kann daher der Nullleiter stromlos sein oder Ströme entgegengesetzter Richtung führen, je nachdem die diesen Strecken entsprechenden Aussenleiterströme gleich sind oder der positive und negative Aussenleiterstrom überwiegt.

131.
Spannungs-
verteilung
im
Dreileiter-
system.

Wie die Stromverteilung, so ist auch die Spannungsverteilung in den Aussenleitern dieselbe, wie in den entsprechenden Leitern der unabhängigen Zweileitersysteme, und der Spannungsverlust des Mittelleiters entsteht durch

Überlagerung der Spannungsverluste der beiden Aussenleiter, vorausgesetzt, dass alle drei Leiter gleichen Querschnitt besitzen. Unter der letzten Voraussetzung erhalten wir demnach die graphische Darstellung der Fig. 140, wenn wir, wie gewöhnlich, den Spannungsverlust als positiv in der Richtung von den Klemmen der Maschine zur Leitung festsetzen und die positiven Spannungsverluste unterhalb der Horizontalen auftragen. ε_p ist also stets eine positive, ε_n stets eine negative Grösse, während ε_0 sowohl positive als negative Werte annehmen kann. Im folgenden sollen daher unter ε_p und ε_n stets die absoluten Werte der Spannungsverluste verstanden sein, ε_0 dagegen soll mit dem Vorzeichen $+$ oder $-$ behaftet sein, je nachdem es die Richtung von ε_p oder ε_n hat. Die Spannungsverlustkurven $O\varepsilon_p$, $O\varepsilon_0$ und $O\varepsilon_n$ über Op , Oo und On geben die Spannungsverteilung in den drei Leitern; die Spannungsverlustkurve $O\varepsilon_0$ entsteht durch algebraische Addition der beiden Kurven $O\varepsilon_{0p} = -O\varepsilon_p$ und $O\varepsilon_{0n} = -O\varepsilon_n$.

Es folgt also, dass bei gleichem Querschnitt aller drei Leiter im allgemeinen der gesamte Spannungsverlust einer Netzhälfte $\varepsilon_p - \varepsilon_0$ bzw. $\varepsilon_n + \varepsilon_0$ kleiner ist als $2\varepsilon_2$, wenn unter ε_2 der im Zweileitersystem im einfachen Leiter auftretende Spannungsverlust verstanden ist. Der gesamte Spannungsverlust würde erst dann den Wert $2\varepsilon_2$ erhalten, wenn die Belastung einer Systemhälfte ganz verschwindet. Ferner ist ersichtlich, dass der Spannungsverlust ε_0 , wenn er positiv ist, sich von dem Verlust im positiven Aussenleiter subtrahiert, dagegen zu demjenigen des negativen Aussenleiters addiert, und umgekehrt. Da nun die Spannung \mathcal{E} am Ende der Leitung gleich derjenigen am Anfang \mathcal{E}_0 vermindert um den gesamten Verlust in der Hin- und Rückleitung ist, also

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_{p0} - (\varepsilon_p - \varepsilon_0) = \mathcal{E}_{p0} - \Delta\varepsilon_p; \quad \mathcal{E}_n = \mathcal{E}_{n0} - (\varepsilon_n + \varepsilon_0) = \mathcal{E}_{n0} - \Delta\varepsilon_n,$$

so folgt, dass die Spannung in der einen Systemhälfte unter Umständen am Ende der Linie grösser sein kann, als am Anfang. Ist nämlich ε_0 positiv und grösser als ε_p , so wird $\Delta\varepsilon_p$ negativ und folglich

$$\mathcal{E}_p > \mathcal{E}_{p0},$$

während zugleich

$$\mathcal{E}_n < \mathcal{E}_{n0}$$

sein muss, da $\Delta\varepsilon_n$ positiv ist. Ist andererseits ε_0 negativ und grösser als ε_n , so ist $\Delta\varepsilon_n$ negativ, also

$$\mathcal{E}_n > \mathcal{E}_{n0},$$

während zugleich $\Delta\varepsilon_p$ positiv, daher

$$\mathcal{E}_p < \mathcal{E}_{p0}$$

ist. Diese beiden Fälle können natürlich nur dann eintreten, wenn der Querschnitt des Nulleiters kleiner ist als derjenige der Aussenleiter und zugleich die Belastung der einen Systemhälfte wesentlich kleiner als die der anderen.

Ferner folgt aus der Fig. 140, dass ε_0 überall verschwinden würde, falls einer Stromentnahme i_p stets an derselben Stelle eine Stromentnahme i_n von gleicher Grösse gegenüberstände. In diesem Falle könnte der ganze zulässige Spannungsverlust $2\varepsilon_2 = \varepsilon$ in einer Aussenleitung verzehrt werden,

132.
Einfluss des
Mittelleiter-
quer-
schnitts.

und die Nulleitung könnte ganz fehlen oder, falls wegen geringer, in der Fabrikation begründeter Stromverschiedenheiten der Verbrauchsapparate eine Ausgleichsleitung erwünscht wäre, einen sehr kleinen Querschnitt erhalten. Ebenso würde sich der Spannungsverlust im Nullleiter nach aussen ganz aufheben, wenn, wie in Fig. 141, Stromabnahmen der einen Systemhälfte von gleichen Stromentnahmen der anderen Hälfte in gleichen Abständen eingeschlossen wären, da einem positiven Spannungsverlust $\varepsilon_{0,\mu,r}$ ein gleich grosser negativer Spannungsverlust folgt. Dagegen würde eine wechselständige Anordnung gleicher Stromverbraucher, wie in Fig. 142, offenbar stets Spannungsverluste von gleicher Richtung im Nullleiter erzeugen, die sich zu einander addieren und daher gerade am Ende der Linie, wo auch in den Aussenleitern der grösste Spannungsverlust auftritt, ungünstig wirken.

Nun werden aber die Kosten der Leitungsanlage eines Dreileitersystems um so geringer sein, je geringer der Verlust im neutralen Leiter ist, da ja dann ein um so grösserer Verlust in den Aussenleitern zulässig ist. Man hat also in Dreileiteranlagen dafür zu sorgen, dass der Mittelleiter möglichst geringe Ströme führt, die in den verschiedenen Teilen des Kabels nicht in gleicher Richtung verlaufen. Bei Centralen geschieht dies in der Weise, dass nicht nur alle Anschlüsse nach dem Dreileitersystem

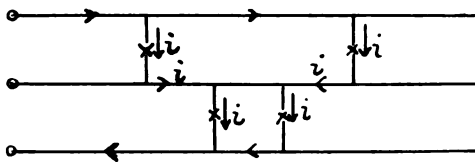


Fig. 141.

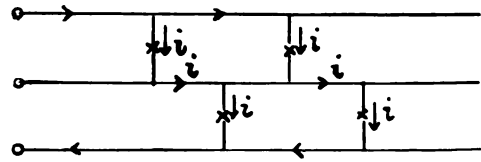


Fig. 142.

ausgeführt werden, sondern auch die zu gleicher Zeit in Betrieb befindlichen Nutzwiderstände möglichst gleichmässig auf die beiden Systemhälften verteilt werden, damit auch bei Belastungsschwankungen stets die gleiche Verteilung gewahrt wird. Nur ganz kleine Anlagen werden nach dem Zweileitersystem ausgeführt und abwechselnd an die beiden Netzhälften angeschlossen. Aber auch bei diesen führt man von dem Verteilungsnetz aus alle drei Leiter zum Zähler, um gegebenenfalls, wenn sich eine ungleichmässige Belastung der beiden Netzhälften herausstellen sollte, eine Umschaltung vornehmen zu können.

Diese Betrachtungen lassen erkennen, dass es unmöglich ist, eine Querschnittsberechnung des Mittelleiters, etwa unter Zugrundelegung eines bestimmten Teils des zulässigen Spannungsverlustes durchzuführen. In der Praxis verfährt man daher in der Weise, dass man die normale Belastung beider Netzhälften als gleich annimmt und nun die sämtlichen Berechnungen wie an einem Zweileiternetz von der (doppelten Zweileiter-) Spannung $E = 2 E_2$ durchführt, dem Mittelleiter aber einen durch praktische Erwägungen bestimmten Querschnitt erteilt, und zwar hat es sich gezeigt, dass für ihn ein Querschnitt gleich 0.25 bis 0.50 desjenigen der Aussenleiter, die nach dem Vorhergehenden und gemäss Abschnitt [38] gleich zu wählen sind, genügt.

133.
Zulässiger
Spannungs-
verlust beim
Dreileiter-
system.

Der zulässige Spannungsverlust einer Anlage hängt, wie wir gesehen haben, von den möglichen Spannungsschwankungen infolge der Belastungsänderungen ab und soll im ganzen 3 bis 4% der Nutzspannung bzw. im

Verteilungsnetz allein 2% nicht übersteigen. Wir schliessen nun von vornherein den praktisch unmöglichen bzw. leicht zu vermeidenden Fall aus unsern Betrachtungen aus, dass die eine Netzhälfte vollständig entlastet sei, während die andere ihre volle Belastung hat, indem wir gemäss dem Vorhergehenden eine so gleichmässige Verteilung der Belastung voraussetzen, dass auch bei den vorkommenden Belastungsschwankungen möglichst gleiche Ströme in den beiden Aussenleitern fliessen. Andererseits aber dürfen wir wiederum nicht voraussetzen, dass unter allen Belastungsverhältnissen der Mittelleiter stromlos ist; dies wäre eine gar zu günstige Annahme, die praktisch ebenfalls unzutreffend wäre. Da nun eine eigentliche Berechnung der Stromverteilung und damit auch des Spannungsverlustes im Mittelleiter nicht angängig ist, so nimmt man auf Grund empirischer Erfahrungen im Betriebe an, dass ein Dreileiternetz dann die einem Zweileiternetz entsprechende Elastizität besitzt, wenn der Spannungsverlust in einem Aussenleiter etwa gleich $\frac{3}{4}$ des gesamten Zweileiterverlustes ist. Es wird also für das Verteilungsnetz

$$\varepsilon = 0.015 \, \varepsilon$$

zu setzen sein, falls wir

$$\varepsilon_2 = 0.02 \, \varepsilon_2$$

als Norm betrachten [126], und für die Speiseleiter

$$\varepsilon_s = 0.75 \, \varepsilon_{2s},$$

wenn ε_{2s} der für Zweileiteranlagen von der Spannung $E_2 = 2 \, \varepsilon$ ermittelte Speiseleiterverlust ist.

Diese Festsetzungen geben uns ein Mittel für die genauere Wahl des Querschnittsverhältnisses des Nullleiters an die Hand, indem wir berechnen,

134.
Wahl des
Mittelleiter-
quer-
schnitts.

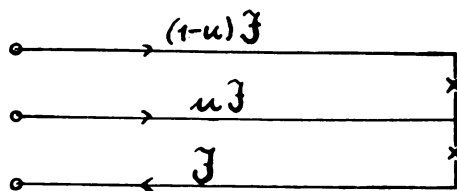


Fig. 143.

wie gross der den letzteren durchfliessende Differenzstrom im Vergleich zur ganzen Belastung, wie gross also die Belastungsverschiedenheit beider Hälften sein darf, damit die volle Spannungsschwankung von 2% der Nutzspannung erreicht wird. Bezeichnen wir das Querschnittsverhältnis der Leiter mit k , den Belastungsunterschied beider Systemhälften mit uJ (Fig. 143), wobei wir den ungünstigsten Fall voraussetzen, nämlich dass eine der nur am Ende belasteten Hälften den vollen Strom zu leisten hat, setzen wir also

$$q = k q_0 \text{ und } J_0 = uJ,$$

so wird

$$\varepsilon_0 = \frac{J_0 l}{q_0} \varrho = \frac{J l \varrho}{q} k u = k u \varepsilon$$

$$\varepsilon_p = (1 - u) \varepsilon$$

$$\varepsilon_n = \varepsilon.$$

Der Spannungsverlust der negativen Hälfte darf also

$$\varepsilon_0 + \varepsilon_n = (ku + 1) \varepsilon = \frac{4}{3} \varepsilon$$

betragen, da ja ε nur 1.5 % von ε ausmacht. Dies ist aber der Fall für

$$u = \frac{1}{3k}$$

d. h. bei

$$\begin{aligned} k = 1 & \text{ für } u = 33 \% \\ k = 2 & \text{ „ } u = 17 \% \\ k = 3 & \text{ „ } u = 11 \% \\ k = 4 & \text{ „ } u = 8 \% \end{aligned}$$

Wenn also die Schwankungen der Belastung einer Hälfte durch sorgfältige Verteilung der Lampen auf 8, 11, 17 und 33 % (bezw. auf 4, 6, 8 und 16 % bezogen auf die Gesamtbelastung) herabgedrückt werden können, so darf der Querschnitt des Nulleiters $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{1}$ des Aussenleiterquerschnitts betragen. Hierbei ist allerdings vorausgesetzt, dass gleichzeitig der Spannungsverlust der positiven Netzhälfte nicht kleiner als Null werden kann, da ja anderenfalls die Spannungsschwankungen grösser als 2 % von ε werden würden. Dass dies nicht der Fall ist, zeigt die Gleichung des Spannungsverlustes der positiven Hälfte:

$$\varepsilon_p - \varepsilon_0 = (1 - u - ku) \varepsilon.$$

Dieser Wert kann nur negativ werden, falls

$$u(1 + k) > 1$$

oder

$$k > \frac{1}{u} - 1.$$

Diese Ungleichung ist aber für die berechneten Werte von u nicht erfüllt.

Je grösser nun die Anlage ist, desto leichter ist es natürlich, die Verteilung so vorzunehmen, dass bei allen Belastungen der Strom im Mittelleiter gering ist, da ja die Anschlusswerte im Verhältnis zu den Leiterströmen dann um so kleiner sind. Man wird also in grossen Anlagen bezw. in denjenigen Teilen einer Anlage, die stärker belastet sind, einen kleineren, in kleinen Anlagen einen grösseren Mittelleiterquerschnitt wählen. Im allgemeinen nimmt man im Verteilungsnetz

$$q_0 = \frac{1}{3} \text{ bis } \frac{1}{2} q,$$

bei den Speiseleitern

$$q_0 = \frac{1}{4} q$$

an. Die Praxis hat allgemein bestätigt, dass bei diesen Querschnitten das Dreileiternetz thatsächlich die gleiche Elastizität besitzt, wie das Zweileiternetz, vorausgesetzt, dass die Verteilung der Belastung auf die beiden Netzhälften sorgfältig vorgenommen und im Betrieb ständig überwacht wird.

Mittelleiter von Mehrleitersystemen dürfen nach den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker weder Schalter noch Sicherungen enthalten. Der Grund hierfür ist aus Fig. 144 leicht ersichtlich. Denken wir uns den Nullleiter von der Stromquelle abgetrennt, sind also die beiden Netzhälften ohne Ausgleichsmöglichkeit in Reihe geschaltet, so verteilt sich die gesamte Spannung E proportional zu den Widerständen r_p und r_n der eingeschalteten Verbraucher. Ist die Zahl dieser in beiden Netzhälften sehr verschieden, so dass etwa r_p sehr klein und r_n gross wird, so würde die Spannung an den Lampen der negativen Hälfte stark ansteigen und die letzteren würden, vielfach unter explosionsartigen Erscheinungen, der Zerstörung anheimfallen. Besässe nun der Mittelleiter seinem geringeren Querschnitte entsprechend schwächere Sicherungen als die Aussenleiter, so würden bei einem Erd- oder Kurzschluss des Null- und eines Aussenleiters fast stets nur die Sicherungen des ersteren abschmelzen und Anlass zu der beschriebenen ungleichmässigen Spannungsverteilung geben.

135.
Sicherung
des Mittel-
leiters.

Die Erfahrung in Gleichstromcentralen hat vielfach bestätigt, dass die theoretisch infolge elektrolytischer Wirkung drohende Verschlechterung der Isolation der negativen Leiter thatsächlich in kurzer Zeit eintritt. Es ist

136.
Erdung des
Mittel-
leiters.

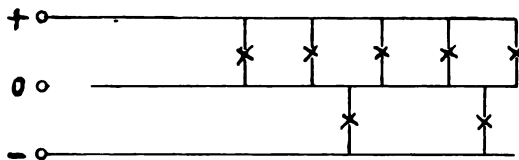


Fig. 144.

deshalb unmöglich oder doch ausserordentlich schwierig, ein selbst vorzüglich isoliertes Leitungsnetz dauernd in gutem Isolationszustande zu erhalten, und es ist daher frühzeitig¹⁾ der Vorschlag gemacht und im Centralenbau praktisch ausgeführt worden, den Mittelleiter zu erden bzw. durch die Bleimäntel der Aussenleiter zu ersetzen. In diesem Falle ist auch in den Hausanlagen der Mittelleiter blank zu verlegen und thunlichst überall durch Lötverbindungen mit der Gas- und Wasserleitung in Berührung zu bringen. Man erreicht dadurch die folgenden Vorteile:

1. Erniedrigung des Potentials der Anlage gegen Erde auf die Hälfte, da bei nicht geerdetem Mittelleiter sich der negative Pol an Erde legen würde. Daher tritt bei Kurzschlüssen nur der vierte Teil der Energie in Wirksamkeit.
2. Isolationsfehler des Netzes zeigen sich selbstthätig an, indem sie schnell zu Kurzschlüssen anwachsen und die nächsten Bleisicherungen zum Schmelzen bringen. Dadurch wird vermieden, dass Erdschlüsse längere Zeit bestehen bleiben und durch ihre Wirkung auf Telephonleitungen Störungen hervorrufen oder durch Funkenbildung an der

1) Der Vorschlag des blanken Mittelleiters ist bereits in der Patentschrift HOPKINSONS (s. Fussnote 1, S. 225) enthalten. In Deutschland wurde die Erdung des Mittelleiters zuerst von HERMANN MÜLLER vorgeschlagen und begründet. ETZ 1890, S. 283, Ersatz des Mittelleiters . . . Vgl. auch die regen Kontroversen über Nutzen oder Schädlichkeit der Erdung des Mittelleiters in den Jahrgängen 1892 bis 1895 der ETZ, sowie im Elektrotechnischen Anzeiger 1905.

Stromübergangsstelle oder durch dauernde Erwärmung, wenn der Widerstand des Erdschlusses bedeutend ist, Brandschäden verursachen können.

3. Die Ausdehnung der Störungsgebiete von Erdschlüssen wird eingeschränkt, da jeder Erdverbindung eines Aussenleiters in nächster Nähe der blanke Nullleiter gegenüber steht.

4. Geringere Kosten der Anlage.

Schon die ersten Anlagen mit blankem Mittelleiter zeitigten die Erfahrung, dass die Bleiumhüllung der Aussenleiter angefressen wurde, und dass unter der Einwirkung elektrolytischer und chemischer Einflüsse im Erdreich der Querschnitt des Mittelleiters geschwächt und in Einzelfällen ganz zerstört wurde. Diese üblen Wirkungen werden dadurch vermieden, dass der Nullleiter entweder verzinkt oder durch einen Anstrich oder eine Isolationschicht gegen die Bodeneinflüsse gesichert wird und durch gelötete Verbindungen (Schellen) mit den Bleimänteln beider Aussenleiter und mit guter Erde (Wasser-, Gas- oder besondere Erdleitung) sowohl in der Centrale als auch in den Kabelkästen und sonst an möglichst vielen Stellen des Netzes elektrischen Kontakt erhält. Der weitere Nachteil, dass eine Fehlerkontrolle¹⁾ während des Betriebes bei geerdetem Mittelleiter unthunlich ist, gilt auch für nicht geerdeten Nullleiter, da ja, wie bereits erwähnt, nach kurzer Zeit der negative Leiter stets Erdschluss zeigt.

Kann dagegen von vorn herein durch peinlichste Kontrolle des Isolationszustandes eines neu verlegten Netzes und durch sofortige Beseitigung auch kleinerer Isolationsfehler eine gute Netzisolation gewährleistet werden, so empfiehlt es sich, nach einem Vorschlage von ERENS,²⁾ den Mittelleiter isoliert zu verlegen und nur an einer Stelle, nämlich in der Centrale, durch eine gute Erdverbindung unter Zwischenschaltung eines Strommessers zu erden, da bei dieser Anordnung auch während des Betriebes eine ständige Messung des Isolationswiderstandes der Aussenleiter ermöglicht wird, allerdings nur solange, als der Nullleiter selbst frei von Erdschluss ist.

Das Fünfleitersystem.

137. Die Erweiterung des Dreileitersystems durch weitere Reihenschaltung von Zweileitersystemen würde zum Vier-, Fünfleitersystem u. s. w. führen. Wie bereits erwähnt, ist von diesen nur das Fünfleitersystem ausgeführt worden, wenn auch bei weitem nicht in dem Umfange wie Dreileiteranlagen. Man kann also das Fünfleitersystem als Reihenschaltung von vier Zweileiter- oder auch von zwei Dreileiteranlagen auffassen (Fig. 145).

Auch in diesem System wird die Strom- und Spannungsverteilung und der Querschnitt der Aussenleiter so berechnet, als ob eine Zweileiteranlage

1) Über Fehlerkontrolle in Leitungsnetzen s. O. FRÖHLICH, Über Isolations- und Fehlerbestimmungen an elektrischen Anlagen, Halle a. S. 1895, sowie ETZ 1893, S. 48. Ferner M. KALLMANN, Über Einrichtungen zur dauernden Kontrolle . . . ETZ 1893, S. 155; ETZ 1898, S. 683. TH. BRÜGER, Isolationsmessungen . . . ETZ 1902, S. 901. E. MCLENDORFF, Die Bestimmung des Isolationswiderstandes . . . ETZ 1896, S. 661; ETZ 1902, S. 1080.

2) FR. ERENS: Zur Frage des blanken oder isolierten Mittelleiters. ETZ 1905, S. 900. Vgl. auch B. SOSCHINSKI: Zur Frage . . . ETZ 1905, S. 1128.

von der vierfachen Spannung mit hintereinander geschalteten Lampenreihen von je vier vorläge. Die Stromstärke in den Aussenleitern beträgt also hier den vierten Teil, der Spannungsverlust das vierfache einer Zweileiteranlage von gleicher Lampenspannung. Auch hier wird die Wahl der Querschnitte

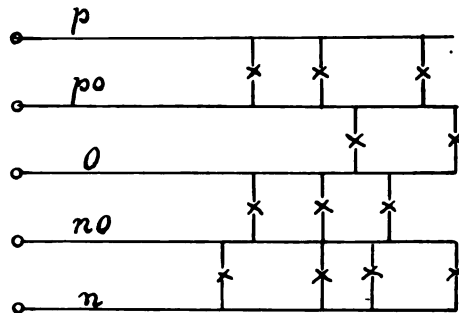


Fig. 145.

der Mittelleiter nach empirischen Erfahrungen bestimmt, und zwar wählt man

$$(q_p = q_n) : (q_{po} = q_{n0}) : q_o = 4 : 2 : 1$$

und nimmt dann bei einem Spannungsverlust von

$$\varepsilon = 0.015 \, \varepsilon$$

in den Aussenleitern an, dass die Elastizität des Systems gleich derjenigen einer Zweileiteranlage von der vierfachen Lampenspannung mit dem Spannungsverlust

$$\varepsilon_2 = 0.02 \, \varepsilon_2$$

ist. Auch hier dürfen die Mittelleiterquerschnitte stark belasteter Speisekabel etwas geringer bemessen werden.

Die Mehrphasensysteme.

Dass das Drei- und Fünfleitersystem bei Gleich- und Wechselstrom in gleicher Weise verwendbar ist, liegt auf der Hand, nur wird man bei letzterem weniger häufig davon Gebrauch machen, da ja die verwendbaren Nutzs spannungen hier nicht durch die erreichbaren Glühlampenspannungen begrenzt sind. Man kann die in den Fernleitungen und im Hochspannungsnetz benutzte hohe Spannung auf einfachstem Wege durch Transformatoren auf jede beliebige Grösse herabsetzen, ohne die mit dem Gebrauch von Mehrleitersystemen unstreitig verbundenen Komplikationen der Netz- und Lampenanordnung in den Kauf nehmen zu müssen. In der That ist auch das Fünfleitersystem überhaupt nicht, das Dreileitersystem nur dort in Wechselstromanlagen ausgeführt worden, wo grosse Energiemengen auf zu bedeutende Querschnitte der Verteilungsleiter führen würden.

Dagegen sind aus anderen Gründen Mehrleitersysteme für Wechselstromanlagen eingeführt worden, die nur für diese Stromart verwendet werden können, nämlich die Mehrphasenströme. Während die Mehrleitersysteme beim

138.
Die Mehr-
leiter-
systeme bei
Wechsel-
strom.

Gleichstrom aus der Notwendigkeit entsprungen, den Speisebereich durch Spannungserhöhung ökonomisch erweitern zu müssen, entstanden die Wechselstrommehrphasensysteme aus den bekannten Mängeln und Schwierigkeiten, die sich der Verwandlung der elektrischen in mechanische Energie mittels des Wechselstromeinphasenmotors entgegenstellen, der infolge seines oszillierenden magnetischen Feldes nur die Inbetriebsetzung bei unbelastetem Zustande gestattet oder teurer und schwerfälliger Anlaufmechanismen benötigt. In jedem Falle aber entnimmt er dem Netz einen ausserordentlich starken Anlaufstrom, wodurch wiederum Spannungsschwankungen und Störungen im Lichtbetrieb hervorgerufen werden. Erst in neuester Zeit ist in dieser Hinsicht ein Fortschritt zu verzeichnen durch den praktischen Ausbau der Kollektormotoren für Einphasenstrom, da es gelungen ist, das Feuern des Kollektors und den übermässigen hohen Anlaufstrom bei belastetem Motor zu beseitigen und ihm derartige Abmessungen zu geben, dass auch Wirkungsgrad und Leistungsfaktor befriedigen.

Da die Mehrphasenströme hingegen in einem Motor ein rotierendes Feld erzeugen, so war von vornherein der Bau von gutwirkenden, dem Gleichstrommotor gleichwertigen Kraftmaschinen einfach. Dies und die Transformierbarkeit sicherten daher den ersteren bei Energieübertragungen auf weite Entfernungen unbedingt den Vorzug sowohl vor dem Gleichstrom als auch vor dem einphasigen Wechselstrom. Man nahm gern dafür den Nachteil der dritten Leitung und die Komplikation der Stromverteilung bei Beleuchtungsanlagen in den Kauf.

139.
Drehstrom-
system.

Auch bei den Drehstromnetzen¹⁾ wird, wie bei den Dreileiternetzen, gleiche Verteilung der Belastung auf die drei Phasen vorausgesetzt, so dass auf jede Phase ein Drittel der gesamten zu liefernden Energie entfällt. Sind also die Belastungen \mathcal{E} in Watt gegeben, so berechnen sich die auf jeden einzelnen Leiter bezüglichen Stromentnahmen sowohl bei Dreieck- als bei Sternschaltung der Verbrauchsapparate aus der Beziehung

$$\frac{1}{3} \mathcal{E} = \frac{1}{3} E i \cos \varphi \quad | \quad 3 = \mathcal{E} i \cos \varphi,$$

wenn, wie stets, E die Linienspannung, also

$$\mathcal{E} = \frac{1}{\sqrt{3}} E$$

das Potential der Leitung bedeutet. Für die Bemessung der Leitungen ist also, abgesehen von der Wahl des zulässigen Spannungsabfalls, über den die Elastizität des Netzes [140] entscheidet, den Abschnitten [107 ff.] nichts hinzuzufügen. Es ist nur zu beachten, dass bei den Niederspannungsnetzen, in denen die Spannung der Glühlampen ausschlaggebend ist, bei Dreieckschaltung E , bei Sternschaltung dagegen \mathcal{E} gleich der Lampenspannung wird. Da ferner bei Voraussetzung einer Belastung mit Glühlampen grössere

1) Die Theorie der Mehrphasenströme wird hier als bekannt vorausgesetzt. Eine eingehende Darstellung derselben s. M. v. DOLIVO-DOBROWOLSKY, Kraftübertragung mittels Wechselströmen von verschiedener Phase, ETZ 1891, S. 149. L. FISCHER, Zur Berechnung von Mehrphasenstromanlagen, ETZ 1895, S. 80. J. TEICHMÜLLER, Elastische Drehstromleitungen, ETZ 1902, S. 1, sowie auch die Lehrbücher von KAPP, THOMSON, TESLA u. a.

oder kleinere Belastungsschwankungen in den drei Zweigen nicht zu vermeiden sind, so folgt, dass, ähnlich wie bei dem Dreileitersystem, bei Sternschaltung eine Ausgleichsleitung vorzusehen ist, die die Nullpunkte der Belastungsgruppen mit dem neutralen Punkte der Energieerzeuger verbindet, um ungleiche Verteilung der Nutzspannung E auf die drei Zweige des Systems zu verhindern [135]. Im allgemeinen ist also das Drehstromsystem in Sternschaltung stets als Vierleitersystem auszubilden; nur wenn ausschliesslich Motoren die Belastung des Netzes bilden, ist eine Verlegung von nur drei Leitern angängig, da in diesem Falle unter allen Belastungsverhältnissen Gleichheit der Stromverteilung in allen drei Zweigen gewahrt ist.

Um uns über die möglichen Spannungsschwankungen einer in Dreieck geschalteten Drehstromanlage einen Anhalt zu schaffen, setzen wir eine einzige Belastung am Ende einer Linie voraus, die zu gleichen Teilen auf die drei Phasen geschaltet ist. In Fig. 146 ist das Schaltungsschema in vereinfachter und ausführlicher Form dargestellt.

Sind zunächst die Belastungen induktions- und kapazitätsfrei, so dass der Strom i_Δ in Phase mit der Nutzspannung E ist, so erhalten wir für volle

140.
Die Elastizität und der zulässige Spannungsabfall in Drehstromnetzen. Dreieckschaltung der Stromempfänger.

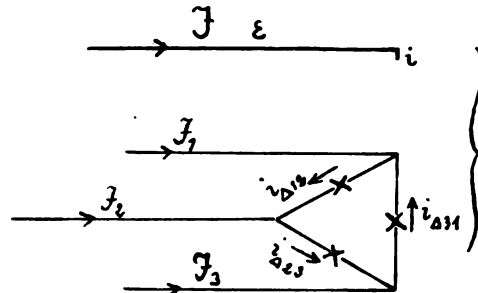


Fig. 146.

Belastung das in Fig. 147 in stark ausgezogenen Linien dargestellte Diagramm der Ströme und Spannungsverluste, wenn wir den Massstab der letzteren so wählen, dass der maximale Spannungsabfall ϵ , der ja phasengleich mit dem Leitungsstrom J ist, auch gleiche Länge wie J besitzt. Denn es ist

$$J_1 = i_{\Delta 12} - i_{\Delta 31} = i_\Delta \sqrt{3} = i$$

$$J_2 = i_{\Delta 23} - i_{\Delta 12} = i_\Delta \sqrt{3} = i$$

$$J_3 = i_{\Delta 31} - i_{\Delta 23} = i_\Delta \sqrt{3} = i$$

und ferner der Spannungsabfall in den einzelnen Phasen:

$$\epsilon_{12} = \epsilon_1 - \epsilon_2 = \epsilon \sqrt{3}$$

$$\epsilon_{23} = \epsilon_2 - \epsilon_3 = \epsilon \sqrt{3}$$

$$\epsilon_{31} = \epsilon_3 - \epsilon_1 = \epsilon \sqrt{3}$$

Der Spannungsverlust ist hier gleich dem Spannungsabfall, da die Linien-spannung E gleiche Phase mit i_Δ , also auch mit $\epsilon \sqrt{3}$ hat.

Nehmen wir nun an, dass zunächst die Belastung einer Phase, etwa $i_{\Delta 23}$ bis Null abnimmt, so nimmt der Vektor J_2 bis zur Grösse $-i_{\Delta 12}$ ab

und dreht sich zugleich bis in die Lage von $-i_{\Delta 12}$; gleichzeitig nimmt ε_2 ab und erhält schliesslich die Grösse und Lage des Vektors $-i_{112}$: der Punkt 2 wandert nach 7. Zugleich bewegt sich auch Punkt 3 nach 8, da

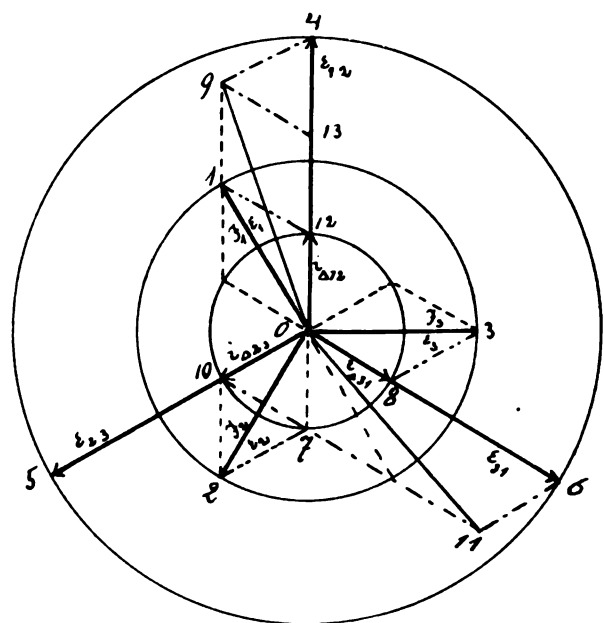


Fig. 147.

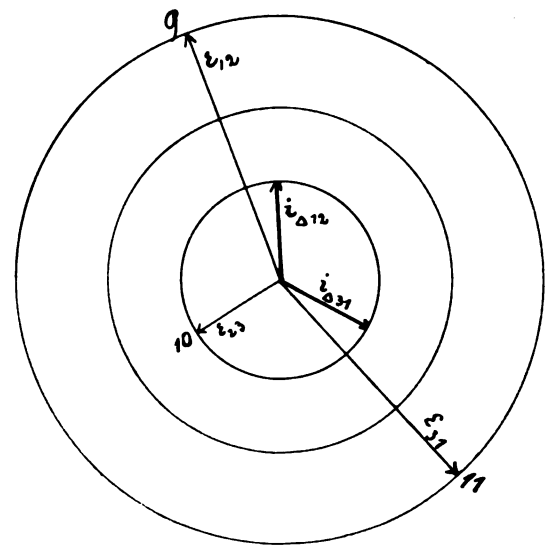


Fig. 148.

auch $-i_{\Delta 23}$ verschwindet. Die Vektoren J_1 und ε_1 dagegen ändern sich nicht. Für die drei Vektoren ε_{12} , ε_{23} und ε_{31} ergeben sich daher die folgenden Änderungen: Der Punkt 4 wandert nach 9 (09 = 01 — 07), 5 nach 10

(010 = 07 — 08) und 6 nach 11 (011 = 08 — 01). Für $i_{123} = 0$ (bezw. sehr klein) wird also der Spannungsabfall in den drei Phasen (Fig. 148):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{12} &= \varepsilon_{31} = 1.53 \varepsilon \\ \varepsilon_{23} &= \frac{\varepsilon}{\sqrt{3}} = 0.577 \varepsilon.\end{aligned}$$

Die grösste Änderung erleidet also der Vektor ε_{23} , und zwar ist bei ihm der Spannungsabfall zugleich Spannungsverlust, da er die Richtung der Spannung E_{23} hat.

Lassen wir weiterhin auch i_{131} zu Null abnehmen, so wird $J_3 = 0$ (Fig. 147), also auch $\varepsilon_3 = 0$: der Punkt 8 des Vektors ε_3 wandert von 8 nach 0; der Endpunkt des Vektors J_1 wandert von 1 nach 12, J_1 erhält also die Grösse i_{112} , während J_2 , wie vorher, gleich $-i_{112} = 07$ bleibt. Ebenso wandert der Endpunkt von ε_1 von 1 nach 12 und ε_2 behält die Lage 07. Daher bewegt sich der Endpunkt von ε_{31} auf der Geraden 11 7 nach Punkt 7, derjenige von ε_{23} von 10 nach 7, während der Endpunkt von ε_{12} von 9 nach 13 wandert.

Ist also nur eine der drei Phasen (12) vollständig belastet, während die beiden anderen ganz entlastet oder nur schwach belastet sind, so wird der Spannungsabfall (Fig. 149):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{12} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon \\ \varepsilon_{23} &= \varepsilon_{31} = \frac{1}{\sqrt{3}} \varepsilon.\end{aligned}$$

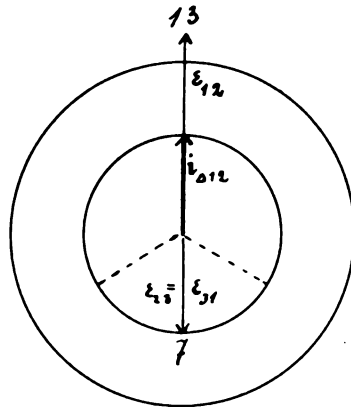


Fig. 149.

Zugleich aber hat sich der Spannungsverlust der Phase 23 (und 31) weiter vermindert, denn die Vektoren des Spannungsabfalls und der Spannung bilden jetzt einen Winkel von 60° , der Spannungsverlust ist also

$$\Delta E_{23} = \Delta E_{31} = \frac{1}{\sqrt{3}} \varepsilon \cos 60^\circ = \frac{1}{2\sqrt{3}} \varepsilon = 0.288 \varepsilon.$$

Wie ersichtlich, kann bei der Dreiecksschaltung von Drehstromanlagen, ähnlich wie bei Zweileiteranlagen, der Spannungsverlust mit Entlastung der Leitungen nur abnehmen, ohne jemals negativ werden zu können; die grössten Spannungsschwankungen sind also durch den Spannungsabfall selbst gegeben und dieser kann daher den grössten Wert erhalten, den wir als zulässig befunden haben, nämlich die Grösse

$$\varepsilon / 3 = 0.02 E; \text{ d. h. } \varepsilon = 0.02 E.$$

Ist die Belastung induktiv, so dass der Stern der Ströme i_1 gegen den Stern der Spannungen E um einen Winkel φ verschoben erscheint, so tritt bei voller Belastung aller drei Zweige anstatt des bisher phasengleichen Spannungsabfalls ε_{12} , ε_{23} und ε_{31} ein Spannungsabfall auf, der mit i_1 phasengleich ebenfalls um φ gegen E verschoben ist; daher wird, wie wir bereits

im Abschnitt [57] gesehen haben, der Spannungsverlust im Verhältnis von $\cos \varphi$ kleiner, d. h. der Spannungsabfall kann für gleichen Spannungsverlust im Verhältnis $\frac{1}{\cos \varphi}$ grösser gewählt werden. Dass für teilweise entlastete Phasen die Verhältnisse innerhalb der praktischen Grenzen ähnlich liegen, ist unmittelbar aus den Fig. 148 und 149 zu ersehen.

141.
Fortsetzung.
Stern-
schaltung.

Bei Sternschaltung der Verbraucher (Fig. 150) sind die Phasenströme i_A gleich den Leiterströmen J . Setzen wir wieder induktionsfreie Belastung voraus, so erhalten wir bei entsprechender Wahl des Massstabes für die ϵ bei gleicher Belastung der drei Phasen das Diagramm der Fig. 151 (stark ausgezogene Linien). Hier ist der für das Funktionieren der Lampen massgebende Spannungsverlust derjenige einer Phase, er setzt sich also aus dem Spannungsabfall einer Aussenleitung und des Nullleiters zusammen. Da der Spannungsabfall als phasengleich mit der Phasenspannung E angenommen wurde, so kommt er auch hier vollständig als Spannungsverlust zur Geltung.

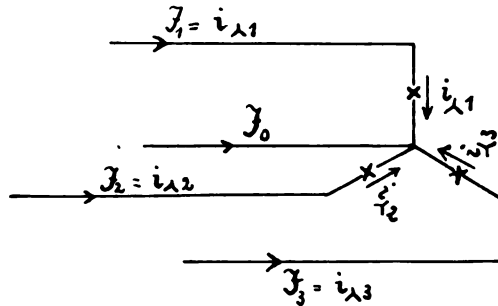


Fig. 150.

Die Nullleitung, deren Querschnitt wir gleich dem der Aussenleiter annehmen, ist zunächst stromlos, also ist

$$\epsilon_1 = \epsilon_{10}, \epsilon_2 = \epsilon_{20}, \epsilon_3 = \epsilon_{30}$$

der gesamte Spannungsverlust der drei Phasen. Er beträgt, wie ein Vergleich der in gleichem Massstab gezeichneten Fig. 151 und 147 lehrt, für gleiche Ströme

$$i_A = i_A \text{ (also für } E_A = \sqrt{3} E_A \text{)}$$

nur ein Drittel des Spannungsverlustes bei Dreieckschaltung.

Vermindert sich jedoch die Belastung einer Phase, so entsteht ein der Differenz gleicher und gleichgerichteter Strom in dem Ausgleichsleiter; nimmt auch die Belastung einer zweiten Phase ab, so ist der Nullleiterstrom der Phase und Grösse nach die geometrische Summe beider Differenzen. Lassen wir also zunächst z. B. den Strom i_{A3} bis auf Null abnehmen, so vermindert sich auch ϵ_3 bis Null, dagegen entsteht ein ϵ_3 gleichgerichteter von 0 bis $\epsilon_3 = 03$ anwachsender Spannungsabfall im Nullleiter, der, im negativen Sinne geometrisch zum Spannungsabfall der drei Aussenleiter addiert, nunmehr den Phasenspannungsabfall ergibt. Es wandert also der Endpunkt des Vektors ϵ_{30} von 3 über 0 nach 4, derjenige von ϵ_{20} von 2 nach 5 und von ϵ_{10} von 1 nach 6. Bei vollständiger Entlastung einer Phase (Fig. 152) ist also

der Spannungsabfall von Phase 1 und 2 gewachsen, derjenige von Phase 3 hat bei gleicher Grösse seine Richtung um 180° geändert. Es ist daher:

$$\varepsilon_{10} = \sqrt{3} \varepsilon = \varepsilon_{20} \quad \text{und der Spannungsverlust } \Delta \varepsilon_{10} = \sqrt{3} \varepsilon \cos 30^\circ = 1.5 \varepsilon = \Delta \varepsilon_{20}$$

$$\varepsilon_{30} = \varepsilon \quad \quad \quad \Delta \varepsilon_{30} = \varepsilon \cos 180^\circ = -\varepsilon.$$

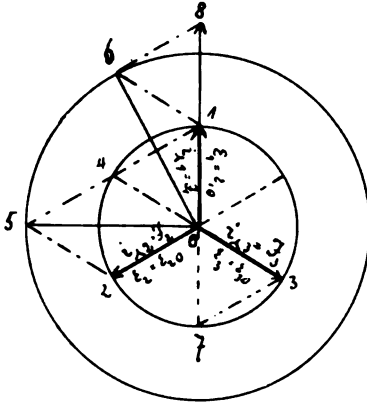


Fig. 151.

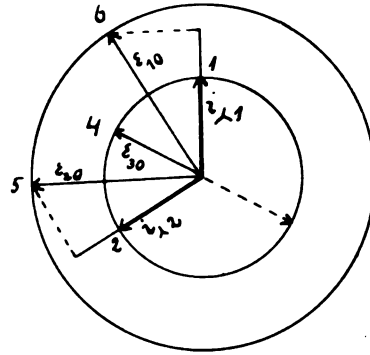


Fig. 152.

Nimmt auch i_{λ_2} auf Null ab, so bewegt sich der Endpunkt des Vektors $O3 = J_0 = \varepsilon_0$ von 3 nach 7 und die (geometrische) Subtraktion dieses Spannungsabfalls von demjenigen der Aussenleiter lässt die Vektorendpunkte 6 nach 8,

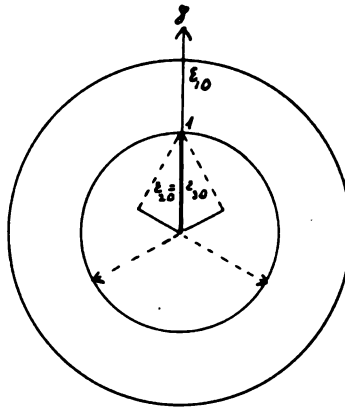


Fig. 153.

5 und 4 nach 1 wandern, so dass das Diagramm der Fig. 153 entsteht. Es ist also jetzt

$$\varepsilon_{10} = 2\varepsilon \quad \text{und der Spannungsverlust } \Delta \varepsilon_{10} = 2\varepsilon$$

$$\varepsilon_{20} = \varepsilon_{30} = \varepsilon \quad \quad \quad \Delta \varepsilon_{20} = \Delta \varepsilon_{30} = \varepsilon \cos 120^\circ = -0.5\varepsilon.$$

Die grösste Änderung, die der Spannungsabfall und der Spannungsverlust bei allen möglichen Belastungsänderungen durchmachen können, ist demnach

$$2\varepsilon \quad (\angle [\varepsilon] = 0^\circ) \quad \text{bzw.} \quad +2\varepsilon,$$

wenn z. B. Phase 1 voll belastet, die beiden anderen Phasen unbelastet sind, und

$$\varepsilon (\angle [\varepsilon] = 180^\circ) \text{ bzw. } -\varepsilon,$$

wenn Phase 1 unbelastet, dagegen 2 und 3 voll belastet sind. Daher ist eine grösste Schwankung der Nutzspannung um

$$2\varepsilon - (-\varepsilon) = 3\varepsilon$$

theoretisch möglich, wenn auch bei sorgfältiger Verteilung der Lasten auf die drei Phasen praktisch leicht zu vermeiden.

Hat der Nullleiter nur den halben Querschnitt der Aussenleiter, so sind die Spannungsschwankungen noch grösser, denn es wird dann für Fig. 152:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{10} = \varepsilon_{20} &= \frac{1}{7} \varepsilon & \Delta \varepsilon_{10} = \Delta \varepsilon_{20} &= 2\varepsilon \\ \varepsilon_{30} &= 2\varepsilon & \Delta \varepsilon_{30} &= -2\varepsilon \end{aligned}$$

und für Fig. 153:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{10} &= 3\varepsilon & \Delta \varepsilon_{10} &= 3\varepsilon \\ \varepsilon_{20} = \varepsilon_{30} &= 2\varepsilon & \Delta \varepsilon_{20} = \Delta \varepsilon_{30} &= -\varepsilon. \end{aligned}$$

Die grösste Spannungsschwankung beträgt also 5ε .

142.
Wahl des
Spannungs-
abfalls und
des Null-
leiterquer-
schnitts bei
Stern-
schaltung.

Aus diesen Betrachtungen ist nun die Folgerung zu ziehen, dass wir bei Drehstromnetzen mit Sternschaltung ebenso wenig wie bei den Dreileiternetzen [133] einen Spannungsabfall von $\varepsilon = 0.02 \varepsilon$ in den Leitern zulassen dürfen. In der That wählt man in der Praxis ebenso wie bei Dreileiteranlagen als zulässigen Spannungsabfall 1.5% der Nutzspannung ε . Prüfen wir nun die zulässige Belastungsänderung bezogen auf die volle Elastizität, also für den Gesamtspannungsverlust von 0.02ε mit Hilfe des gleichen Verfahrens, das wir im Abschnitt [134] für das Dreileitersystem angewendet haben, so erhalten wir gemäss Diagramm der Fig. 151, wenn wir zunächst voraussetzen, dass nur eine Phase, etwa 3, um uJ entlastet wird, während die beiden anderen voll belastet bleiben:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{10} = \Delta \varepsilon_{20} &= \varepsilon + uk\varepsilon \cos 60^\circ = \varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} uk\right) \\ \Delta \varepsilon_{30} &= \varepsilon (1 - u - uk). \end{aligned}$$

Die ersten beiden Werte dürfen daher die Grösse $\frac{4}{3} \varepsilon$ erhalten, falls nur der Wert $\Delta \varepsilon_{30}$ positiv bleibt. Es ergeben sich also für u die folgenden beiden Bedingungsgleichungen:

$$u = \frac{2}{3k} \quad u < \frac{1}{1+k}$$

d. h. für

$k = 1$	$u = 67\% \text{ oder } u \leq 50\%$
2	33 " 33 "
3	22 " 25 "
4	17 " 20 "

Nur für $k = 1$ ist der Wert der zweiten u -Reihe grösser als der der ersten, also wir dürfen demnach $k = 4, 3, 2$ oder 1 annehmen, falls die Belastungs-

Änderung einer Phase allein höchstens 17, 22, 33 oder 50 % ihrer Maximalbelastung, d. h. bezogen auf die Gesamtbelastung höchstens 6, 7, 11 oder 17 % erreicht.

Fordern wir dagegen, dass sich zwei Phasen, etwa 2 und 3 gleichzeitig um 100 u % ihrer Vollast ändern sollen, während Phase 1 voll belastet bleibt, so werden für $k = 1$ die Verhältnisse sogar noch günstiger. Denn jetzt ist, wie vorher

$$\Delta \mathcal{E}_{10} = \varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} u k \right),$$

dagegen

$$\Delta \mathcal{E}_{20} = \Delta \mathcal{E}_{30} = \varepsilon \left(1 - u - \frac{1}{2} u k \right),$$

also wird

$$u = \frac{2}{3k} \quad u \leq \frac{1}{1+k/2}$$

und für

$k = 1$	$u = 67\%$	oder $u \leq 67\%$
2	33 "	50 "
3	22 "	40 "
4	17 "	33 "

also darf für $k = 1$ die Belastungsschwankung zweier Phasen bis 67 % (22 % bezogen auf die Gesamtbelastung) betragen, während für die übrigen Querschnittsverhältnisse die vorher ermittelten Werte bestehen bleiben.

Um nun die bedingte Elastizität des Drehstromnetzes mit der des Dreileiternetzes zu vergleichen, haben wir die jetzt gefundenen zulässigen Belastungsschwankungen mit den entsprechenden des Dreileiternetzes in Beziehung zu setzen, und zwar ist die Vergleichung wohl am einwandfreiesten, wenn man die auf die ganze Belastung bezüglichen Zahlen beider Netze heranzieht. Diese sind:

bei $k =$	. . . . . 4	3	2	1
für Dreileiternetze	. . . . . 4	6	8	16 %
für Drehstrom-Sternschaltung	6	7	11	17 ,,

also im letzten Fall noch etwas günstiger als im ersten Falle. Hat die Praxis also bei den Dreileiternetzen gezeigt, dass ein Spannungsverlust bzw. Spannungsabfall von 1.5 % der Nutzspannung in den Aussenleitern zu wählen ist, um den Bedingungen der Elastizität bei Querschnitten des Mittelleiters, die $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ der Aussenquerschnitte betragen, zu genügen, so gilt das gleiche von den Drehstromnetzen mit Sternschaltung, falls für gleich gute Verteilung der Lasten auf die drei Phasen Sorge getragen wird.¹⁾

Das Zweiphasensystem besteht bekanntlich aus zwei Einphasensystemen, deren Phasen um 90° gegeneinander versetzt sind. Sind die beiden Phasen nicht miteinander verkettet (Fig. 154), so ist jede Hälfte des Systems mit der Spannung $E = 2\varepsilon$ von der anderen vollständig unabhängig und hat die

148.
Zweiphasen-
netze.

1) Vgl. hierzu auch TEICHMÜLLER, Elastische Drehstromleitungen, ETZ 1902, S. 1, der infolge eines Irrtums bei der Berechnung der zulässigen Belastungsschwankung in Dreileiternetzen zu anderen Ergebnissen kommt.

Hälfte der Verbraucher zu speisen. Die Berechnung beider Netzhälften findet getrennt für je eine Hälfte der Belastung statt.

Sind dagegen die beiden Phasen miteinander verkettet (Fig. 155), so setzen sich die beiden um 90° verschobenen Spannungen \mathcal{E} zur Gesamtspannung $E = \sqrt{2} \mathcal{E}$ zusammen, und der Strom im Mittelleiter ist $J_0 = \sqrt{2} J$ (Fig. 156 und 157), falls bei gleicher Belastung J der Strom jeder Hälfte ist.

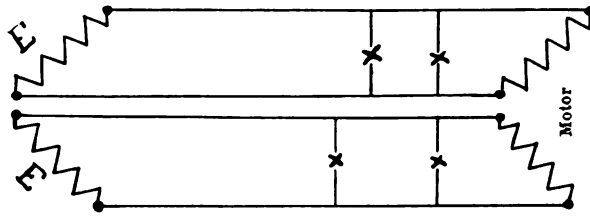


Fig. 154.

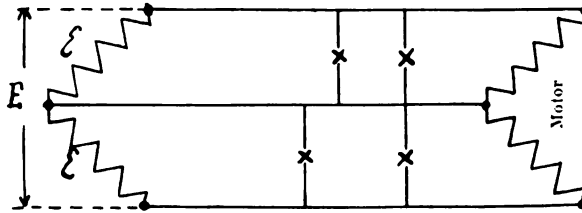


Fig. 155.

Man wählt daher vielfach bei diesem in der Praxis wenig benutzten unsymmetrischen System, um gleiche Stromdichten zu erhalten, den Querschnitt des Mittelleiters zu $\sqrt{2} q$ (vergl. auch [22]), wenn q der für jede als unabhängig betrachtete Netzhälfte ermittelte Querschnitt ist.

Es fragt sich nun, welcher Spannungsabfall hier zulässig ist. Beschränken wir die Untersuchung auf die Annahme, dass alle drei Leiter den gleichen

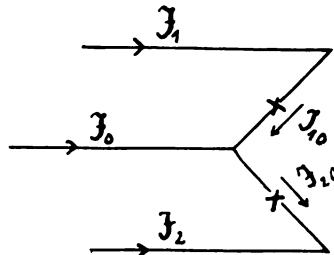


Fig. 156.

Querschnitt erhalten, so wird der Spannungsabfall im Mittelleiter $\varepsilon \sqrt{2}$, wenn ε derjenige der Aussenleiter ist. Wir erhalten also das Diagramm der Fig. 157, wenn wir wieder den Massstab der ε so wählen, dass die Längen der J zugleich den entsprechenden Spannungsabfall darstellen. Es ist nämlich, wenn J_{10} und J_{20} in Phase mit den Spannungen \mathcal{E}_1 und \mathcal{E}_2 angenommen werden,

$$J_1 = J_{10}; J_2 = -J_{20}; J_0 = J_{20} - J_{10} = -(J_1 + J_2)$$

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_1 - \varepsilon_0; \quad \varepsilon_{20} = \varepsilon_0 - \varepsilon_2.$$

Dabei wird für volle Belastung beider Zweige:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_{20} = \varepsilon \sqrt{5}; \quad \Delta \varepsilon_{10} = \Delta \varepsilon_{20} = \sqrt{(\varepsilon \sqrt{5})^2 - \varepsilon^2} = 2\varepsilon.$$

Nimmt nun die Belastung der einen Hälfte, etwa J_{20} , zu Null ab, so wandern die Vektorendpunkte 2 und 4 nach 0, 3 nach 7, also 5 nach 8 und 6 nach 7, da ja $\varepsilon_1 = 01$ unverändert bleibt. Demnach wird für sehr kleines J_{20} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{10} &= 2\varepsilon_1, & \Delta \varepsilon_{10} &= 2\varepsilon_1, \\ \varepsilon_{20} &= \varepsilon_1, & \Delta \varepsilon_{20} &= 0, \end{aligned}$$

denn ε_{20} steht senkrecht auf J_{20} . Die grösste Spannungsschwankung kann also selbst bei vollständiger Entlastung einer Netzhälfte nicht mehr als 2ε

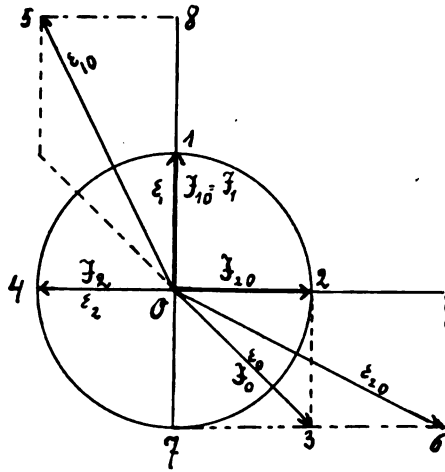


Fig. 157.

betragen, wenn der Mittelleiterquerschnitt gleich demjenigen der Aussenleiter ist. Wir haben demnach für diesen Fall den Spannungsabfall in einem Aussenleiter zu

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot 0.02 \varepsilon = 0.01 \varepsilon$$

zu wählen und erhalten dann volle Elastizität des Netzes, wie beim Zweileiter und Drehstromsystem in Dreieckschaltung.

Erhält der Mittelleiter den $\sqrt{2}$ -fachen Querschnitt der Aussenleiter, so ist der Gesamtspannungsverlust bei voller Belastung nur

$$\varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{2} \right) = 1.71 \varepsilon,$$

der Spannungsabfall in den Aussenleitern kann also im Verhältnis von $\frac{2}{1.71} = 1.17$ vergrössert und gleich 0.0117ε gewählt werden.

Vergleich der Metallmengen der verschiedenen Leitungssysteme.

144. Wollen wir die für die verschiedenen Leitungssysteme zu verwendenden Metallmengen und damit, wenigstens angenähert, auch die Kosten der Netze miteinander vergleichen, so haben wir grundsätzlich die Vergleichung der Niederspannungsnetze und der mit Hochspannung betriebenen Fernleitungen zu trennen, da, wie die Entwicklung gezeigt hat, die Berechnung beider auf verschiedenen Grundlagen beruht. Für den Querschnitt der Fernleitungen war ausschliesslich die Wirtschaftlichkeit des Betriebs massgebend gemacht worden, während für Niederspannungsnetze die hierdurch gegebenen Forderungen zurücktreten (bei den Speiseleitungen allerdings nur in beschränktem Masse) und der einen guten Betrieb erst ermöglichenden Bedingung der Elastizität und des Ausgleichs das Feld räumen mussten. Ferner konnten wir die Höhe der Spannung bei den Fernleitungen (und Primärnetzen) von Erwägungen abhängig machen, die ebenfalls auf Erreichung einer möglichst günstigen Wirtschaftlichkeit hinzielten; bei den Niederspannungsnetzen war dagegen von vornherein die grösste Spannung durch diejenige Grenze gegeben, für welche Glühlampen hergestellt werden können, und erst innerhalb dieser engen Grenze können Erwägungen wirtschaftlicher Natur, wie Netzkosten, Ökonomie und Lebensdauer der Glühlampen u. dgl., Platz greifen.

Abgesehen von der selbstverständlichen Forderung, dass die Vergleichung auf Grund gleicher Netzleistung zu erfolgen hat, werden wir daher bei Niederspannungsnetzen zur Vergleichsgrundlage gleiche Lampenspannung und gleiche Elastizität, bei Fernleitungen (und Hochspannungsnetzen) dagegen gleiche Linienspannung und gleichen Spannungs- bzw. Energieverlust zu wählen haben. Es werden sich also zwei Reihen von Gleichungen entwickeln lassen, die diesen beiden Gesichtspunkten Genüge leisten.

145. Bezeichnen wir mit η einen auf die Leiterzahl der verschiedenen Leitungssysteme bezüglichen, also veränderlichen Faktor, so können wir das Kupfervolumen eines Verteilungsnetzes ausdrücken durch

$$V = \Sigma \eta q l.$$

Der Vergleich soll für dasselbe Verteilungsgebiet bei Verwendung verschiedener Stromarten erfolgen, also können wir anstatt des Summenzeichens

und der Längen l eine Konstante einsetzen, so dass, falls wir allgemein als Spannungsabfall die bei gleicher Elastizität veränderliche Grösse $\frac{\varepsilon}{\cos \varphi}$ einführen,

$$V = C \eta q = C \eta \frac{J l q}{\varepsilon / \cos \varphi} = C \eta \frac{J \varepsilon \cos \varphi}{p \varepsilon^2} l q \quad . \quad . \quad (209)$$

wird. Die Zeichen haben die bekannte Bedeutung. Führen wir nun die konstanten Grössen \mathfrak{E} , die von dem Netz zu leistende Energie, und die Lampenspannung E_l ein, schreiben wir also

$$E_l = \lambda \varepsilon; \quad \zeta J \varepsilon \cos \varphi = \mathfrak{E},$$

wo λ und ζ weitere veränderliche Faktoren bedeuten, so wird, wenn wir alle unveränderlichen Grössen in die Konstante C einbegreifen:

$$V = C \frac{\eta \lambda^2}{p \zeta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XXXVIII)$$

Wir brauchen also nur den Grössen η , λ , ζ und p die den einzelnen Systemen eigentümlichen Werte zu geben, um die Verhältniszahlen für die Metallmengen zu erhalten.

1. Zweileitersystem.

Ein Unterschied zwischen Gleich- und Wechselstromnetzen ist, wie wir auch schon früher gesehen [47], nicht vorhanden. Es ist $p = 0.02$, bzw. wenn wir den Faktor $\frac{1}{100}$ in C einschliessen,

$$p = 2; \quad \eta = 2; \quad \lambda = 2 \quad \text{und} \quad \zeta = 2,$$

da

$$\varepsilon = 0.02 \mathfrak{E} \quad \text{und} \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{2} E = \frac{1}{2} E_l;$$

also wird

$$V_2 = 2 C.$$

2. Dreileitersystem.

Hier ist für $q_0 = 0.5 q$ bis $0.25 q$

$$\eta = 2.5 \text{ bis } 2.25; \quad p = 1.5; \quad \lambda = 1; \quad \zeta = 2;$$

also

$$V_3 = 0.83_3 C \text{ bis } 0.75 C.$$

3. Fünfleitersystem.

Für $q_p = q_n = 2 q_{p0} = 2 q_{n0} = 4 q_0$ wird

$$\eta = 3.25; \quad p = 1.5; \quad \lambda = \frac{1}{2}; \quad \zeta = 2;$$

also

$$V_5 = 0.27 C.$$

d. h. die Kupfermengen der Leitungssysteme verhalten sich umgekehrt proportional zum Quadrat der Lampenspannung, so dass z. B. bei doppelter Lampenspannung nur der vierte Teil des Kupfers benötigt wird.

Die bei Fernleitungen für die Beanspruchung der Isolation zweier Drähte in Frage kommende Spannung ist bei Gleichstrom die Linienspannung E , bei Wechselstrom dagegen der Maximalwert der Spannung, also falls wir sinusförmigen Verlauf der Spannungskurve voraussetzen,

$$E_m = \sqrt{2} \ E = 1.41 \ E.$$

Ferner soll der Energieverlust $p' \mathfrak{E}$ konstant sein, folglich wird auch p unveränderlich und kann in die Konstante C einbegriffen werden. Setzen wir also

$$E_m = \xi \varepsilon,$$

so erhalten wir anstatt der Gleichung (XXXVIII) nunmehr:

$$V = C \frac{\eta \xi^2}{\zeta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XL)$$

In Frage kommen für Hochspannungsfernleitungen nur das Zweileitersystem für Gleich- und Wechselstrom und die Mehrphasensysteme.

1. Zweileiter-Gleichstrom.

$$\eta = 2; \quad \zeta = 2; \quad \xi = 2: \quad V_{2g} = 4 \text{ C.}$$

2. Zweileiter-Wechselstrom.

$$\eta = 2; \quad \zeta = 2; \quad \xi = 2\sqrt{2}; \quad V_{2w} = 8 \text{ C.}$$

3. Drehstrom mit Dreieckschaltung.

$$\eta = 3; \quad \zeta = 3; \quad \xi = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}; \quad V_{\Delta} = 6 C.$$

4. Drehstrom mit Sternschaltung.

a) Ohne Mittelleiter:

$$\eta = 3; \quad \zeta = 3; \quad \xi = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}; \quad V_{\Delta 3} = 6 \text{ C.}$$

b) Mit Mittelleiter, $q_0 = 0.5 q$ bis $0.25 q$.

$$\eta = 3.5 \text{ bis } 3.25; \quad \zeta = 3; \quad \xi = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}; \quad V_{\lambda 4} = 7 \text{ C bis } 6.5 \text{ C}.$$

5. Zweiphasenstrom, verkettet.

$$\eta = 3; \quad \zeta = 2; \quad \xi = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2}; \quad V_{18} = 6 \text{ C.}$$

Wir erhalten demnach die folgende Zusammenstellung der Metallmengen, wenn wir die für Zweileiter-Gleichstrom gleich 100 setzen:

	V_{2g}	V_{2w}	V_3	V_5	V_Δ	$V_{\Delta 3}$	$V_{\Delta 4}$	$V_{\perp 8}$
Gleiche Elastizität . .	100	100	41·7 bis 37·5	13·5	75·0	25·0	38·9 bis 36·2	75·0 (73·0)
Gleiche Linienspannung	100	200	—	—	150	150	175 „ 162	150.

147.
Gleiche
Linienspan-
nung und
gleicher
prozentualer
Energie-
verlust.
Hoch-
spannungs-
leitungen.

Vergleich der mit den verschiedenen Systemen erreichbaren Speisegebiete.

148.
Mittlere
Radien der
Speise-
gebiete.

Soll schliesslich noch der mittlere Radius des erreichbaren Speisegebietes für die verschiedenen elastischen Netzsysteme verglichen werden, so haben wir in Gleichung (209) l als veränderlich zu betrachten und erhalten:

$$V = \frac{C \eta \lambda^2 \mathfrak{E}}{p \zeta E_t^2} l^2.$$

Das aufzuwendende Kupfervolumen wächst also proportional mit dem Quadrat der Entfernung und mit der zu übertragenden Leistung, und umgekehrt proportional zum Quadrat der Lampenspannung. Für gleiche Leistung, gleiche Kupfermenge und gleiche Lampenspannung erhalten wir demnach:

$$l = \frac{C}{\lambda} \sqrt{\frac{p \zeta}{v}} \quad \text{(XLI)}$$

und diese Gleichung giebt als Verhältnis der erreichbaren Entfernungen:

l_2	l_3	l_5	l_Δ	$l_{\lambda 3}$	$l_{\lambda 4}$	$l_{\perp 4}$	$l_{\perp 3}$
100	155—163	272	115	200	160—167	100	115.

Praktische Erfahrungen haben ergeben, dass Zweileiteranlagen noch ökonomisch gebaut werden können, wenn bei etwa 100 Volt Lampenspannung die grösste Entfernung des Speisegebietes von der Centrale 500—800 m, bei 200 Volt Lampenspannung 800—1200 m beträgt. Legen wir diese Zahlen der Rechnung zu Grunde, so erhalten wir die folgenden Entfernungen:

	l_2	l_3	l_5	l_Δ	$l_{\lambda 3}$	$l_{\lambda 4}$	$l_{\perp 3}$
$E_l = 100$:	500—800	800—1300	1350—2200	600—900	1000—1600	800—1300	600—900
$E_l = 200$:	800—1200	1250—1900	2200—3300	900—1400	1600—2400	1300—2000	900—1400.

Messung der mittleren Netzspannung.

Wir haben im Laufe der Untersuchung mehrfach gesehen, dass die Regulierung eines Netzes auf konstante Spannung im Maschinenhause durch Veränderung der Maschinenspannung bewerkstelligt wird, und zwar derart, dass die Speisepunkte des Netzes stets die gleiche, nämlich die mittlere Netzspannung besitzen. Zu diesem Zwecke muss natürlich die Spannung der Speisepunkte in der Centrale jederzeit ermittelt werden können, und das geschieht dadurch, dass entweder alle oder auch nur die wichtigeren Speisepunkte durch besondere Leitungen, die Spannungs- oder Prüfdrähte, mit einem Spannungsmesser in der Centrale verbunden werden. Bei unterirdischen Kabelnetzen sind diese Prüfdrähte gewöhnlich unmittelbar in die Kabel eingelegt (natürlich isoliert von der Kabelseele), bei oberirdischen Netzen werden sie gesondert auf Isolatoren verlegt.

149.
Die
Prüfdrähte.

Da diese Drähte nur einen sehr geringen Strom zu führen haben, so erhalten sie einen kleinen Querschnitt; bei Kabeln beträgt er gewöhnlich 1 mm². Um die Spannung an jedem einzelnen Speisepunkte als auch an allen zugleich (mittlere Netzspannung) messen zu können, werden die Prüfdrähte an entsprechend gebaute Umschalter geführt, die eine Verbindung des Spannungsmessers sowohl mit jedem einzelnen Drähtepaar als auch mit allen zugleich gestatten.

Setzen wir nun zunächst voraus, der Spannungsmesser vom Widerstande $2r$ sei mit einem Speisepunkte verbunden (Fig. 158), so erzeugt die Speisepunktsspannung E in dem Stromkreis einen Strom

$$i = \frac{E}{2(n+r)},$$

und die von dem Instrument angezeigte Spannung E' ist

$$E' = 2ir = E - 2in,$$

also kleiner als die Speisepunktsspannung. Das Verhältnis beider Grössen ist

$$\frac{E'}{E} = \frac{r}{n+r} = \frac{1}{1 + \frac{n}{r}},$$

also um so näher gleich der Einheit, je grösser r im Verhältnis zu n ist. Bei den gewöhnlichen technischen Spannungsmessern ist allerdings der innere Widerstand nicht so gross, dass $\frac{n}{r}$ gegen 1 vernachlässigt werden könnte. Ferner folgt auch, dass der Spannungsmesser bei gleichem E verschiedene Werte E' ergeben würde, falls n verschieden gross ist, d. h. also, falls die Entfernungen der Speisepunkte von der Centrale verschieden sind. Man umgeht diese beiden Schwierigkeiten dadurch, dass man durch Vorschaltwiderstände alle Prüfdrähte (Hin- und Rückleitungen) auf den gleichen Wert bringt, und zwar schaltet man gewöhnlich auch vor den längsten Prüfdraht noch einen kleinen Widerstand, um auf diese Weise zu runden Werten zu gelangen. Man erhält so für gleiches E auch die gleichen Instrumentangaben für alle Speisepunkte, wenn diese auch zunächst noch nicht die wahren Speisepunktsspannungen sind. Soll der Spannungsmesser auch die wahren Speisepunktsspannungen angeben, so hat man ihn nur unter Vor-

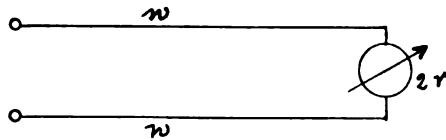


Fig. 158.

schaltung eines gleichen Widerstandes zu eichen, so dass die in Volt angegebene Teilung des Instrumentes dem Gesetz entspricht

$$E = 2 i_0 (n + r),$$

wenn i_0 derjenige Strom ist, den den Ausschlag E hervorbringt.

Liegen nun aber n Speisepunkte parallel am Spannungsmesser (Fig. 159), so sei vorausgesetzt, dass die mittlere Spannung

$$E_m = \frac{1}{n} \sum E_r = E = 2 i_0 (n + r)$$

ist. Es wird dann:

$$\mathcal{E}_I = i_I n + i_0 r$$

$$\mathcal{E}_{II} = i_{II} n + i_0 r$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\mathcal{E}_n = i_n n + i_0 r$$

$$i_I + i_{II} + \dots + i_n = i_0.$$

Also erhalten wir

$$\sum \mathcal{E} = n i_0 \left(\frac{n}{n} + r \right)$$

und die mittlere Netzspannung, die der Spannungsmesser anzeigt, ist

$$E_m = \frac{1}{n} \sum E = 2 i_0 \left(\frac{n}{n} + r \right),$$

während

$$E_m = 2 i_0 (n + r)$$

sein soll. Der Spannungsmesser giebt also eine zu kleine Spannung an, und der Fehler ist um so grösser, je grösser die Zahl der angeschlossenen Speisepunkte ist. Um richtige Werte zu erhalten, hat man demnach entweder den noch fehlenden Widerstand $\frac{n-1}{n} w$ vor den gemeinsamen Schalterkontakt zu legen, oder man muss $2r$ so gross machen, dass $\frac{n-1}{n} w$ gegen r zu vernachlässigen ist.

Setzen wir in runden Zahlen bei 110 Volt Netzspannung als grösste Speisekabellänge 1000 m und einen Querschnitt des Prüfdrahtes von 1 mm^2 ein, so wird der Prüfdrahtwiderstand

$$w_p = 1000 \cdot 0.018 = 18 \, \Omega,$$

der auf $w = 20 \, \Omega$

abgerundet werden soll. Der Spannungsmesser habe einen inneren Widerstand von

$$2r = 1000 \, \Omega$$

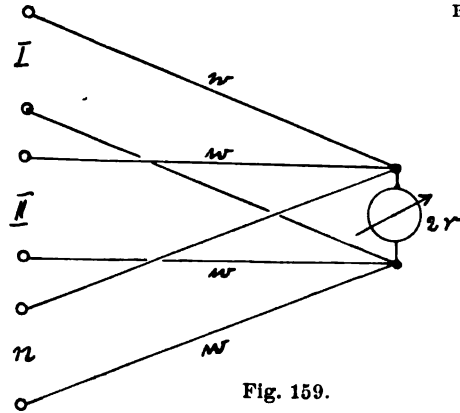


Fig. 159.

(Schaltbrettinstrument). Die Anzahl der angeschlossenen Speisepunkte sei

$$n = 10.$$

Dann wird:

$$w + r = 520,$$

und der Fehler in der Messung der mittleren Netzspannung beträgt

$$\frac{\frac{n-1}{n} w}{w + r} = \frac{0.9 \cdot 20}{520} = 0.035,$$

also 3.5% , eine Grösse, die natürlich nicht vernachlässigt werden kann. Der vor den gemeinsamen Kontakt zu schaltende Widerstand würde

$$\frac{n-1}{n} w = 18 \, \Omega$$

betragen.

Hätte der Spannungsmesser einen inneren Widerstand von etwa $10000 \, \Omega$ (Präzisionsinstrument), so würde der Fehler nur noch 0.35% betragen, also zu vernachlässigen sein.

Sachregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

- Ableitung 69; Messung der 77.
Admittanz 59, 61, 73.
Amortisation von Anlagen 26.
Anlagekosten bei Akkumulatoren 22; bei Dampfbetrieb 21; bei Wasserkraft 21; von Kabeln 20; statistische Daten 221.
Anschlusswerte von Centralen 221.
Äquipotentielle Verlegung der Ströme 101.
Äquivalenter Widerstand 32.
Ausgleich, Definition 165, 171, 178; Kontrolle 217; Verbesserung des 166.
Ausgleichsberechnung von Netzen 160.
Ausgleichsleiter beim Dreileitersystem 225, 229; beim Drehstromsystem 235; Erdung des 231; Sicherung des 231.
Ausgleichsstrom 164.

Beanspruchung, Kurve der jährlichen, einer Centrale 31.
Belastungsänderung, wirksame 183, 186.
Belastungsfaktor 220.
Belastungsschwankung 8; Einfluss der — auf den Ausgleich 164.
Betriebsdauer, jährliche, der Anlage 23. 25.
Betriebskosten 22.
Betriebszahl 16, 28.
Bezeichnungen bei geschlossenen Netzen 91, 203; bei offenen Leitungen 35; in Wechselstromkreisen 59.
Blanke Leiter, Beanspruchung und Erwärmung 6; Mittelleiter 231.

Centrale, günstigste Lage der 219.

Dauer des vollen Betriebes 23.
Drehstromnetze 234; mit Dreieckschaltung 235; mit Sternschaltung 238; wirtschaftliche Grössen bei 18.
Dreileitersystem 225; Fehlerkontrolle beim 232.

Elastizität einer Anlage 7; bei Parallelschaltung 31, 33; bei Reihenschaltung 10; bei Drehstromnetzen 235; bedingte — bei Dreileiternetzen 229; bedingte — bei Drehstromnetzen 241.

Energiebedarf, maximaler gleichzeitiger 26, 220.
Energieverlust, wirtschaftlicher 13, 16; durchschnittliche Dauer der vollen — 15, 22.
Erdung des Nullleiters 231.
Erneuerungsfond 26.
Erwärmung der Leiter 5.
Erweiterung von Netzen 222.

Fehlergrösse bei Bestimmung der Stromstärken und Querschnitte 34.
Fehlerkontrolle beim Dreileiternetz 232.
Feuersicherheit, Kontrolle auf 5, 16, 220
Freileitungen, Übertemperatur bei 6.
Fünfleitersystem 232.

Genauigkeit der Zahlenrechnung 10.
Gesetz von Ohm 4; erweitertes 75; von Kirchhoff 4; der Superposition 37.
Gleichungen s. Netzgleichungen.
Graphische Darstellung der Spannungsverteilung bei offenen Leitern 37; bei geschlossenen Leitern 98; bei unvollkommen geschlossenen Leitern 101; bei Wechselstrom 72; der Stromverteilung 96; bei Wechselstrom 74.
Graphische Ermittlung der wirtschaftlichen Grössen 29.
Gruppenschaltung 8.

Hauteffekt, Widerstandserhöhung infolge 64.

Impedanz 59, 61, 66.
Induktivität 65; bei geschlossenen Verteilungsnetzen 135; Messung der 76.
Instandhaltungsquoten 27.

Kabel, Belastung der 6.
Kapazität 66, 69; bei geschlossenen Verteilungsnetzen 135; Messung der 77.
Knotenpunkte 90.
Komplexe Grössen bei Wechselstromkreisen 59.
Konduktanz 61, 73.

Kontrolle von Leitern auf Erwärmung 5, 16; auf Spannungsverlust 5, 6, 38; bei langen Leitungen 87; des Netzes auf Ausgleich 217; in Betrieb befindlicher Netze 130; der Rechnung bei Auflösung der Netzgleichungen beim Gausschen Verfahren 118, 121; beim Verhoeckx'schen Verfahren 130; bei der Methode der widerstandstreuen Netzumbildung 146.

Koordinatensystem, rechts drehendes 59.

Kreuzungspunkt 90.

Kupfervolumen bei konstantem Querschnitt 45; bei konstanter Stromdichte 45; günstigstes 38.

Länge, fiktive, bei verzweigten Leitern 50, 52.

Leistungsfaktor 18, 75, 78.

Leiter, offene 3; geschlossene 92; unvollkommen geschlossene 98; gleichförmig belastete 46, 95; verzweigte 49.

Leitfähigkeit 32; bei Wechselstrom 61.

Leitungszahl 16, 28.

Löschbarkeit der Lampen bei Parallelschaltung 33; bei Reihenschaltung 10.

Masche, Definition 90.

Mehrleitersysteme 224.

Mehrphasensysteme 233.

Messung der Konstanten des Wechselstromkreises 74; der mittleren Netzspannung 249.

Mittelleiter, Bestimmung bei Verlegung von 5; beim Dreileitersystem 225, 229; Erdung des 231; Sicherung des 231; beim Drehstromsystem 235; beim Zweiphasensystem 242; Zerstörung des blanken 232.

Näherungsverfahren bei Bestimmung der Leiterströme 34; bei Berechnung langer Leitungen 87; von Gauss 116, 121; von Mehmke 121; von Verhoeckx 123; Vergleich der 133.

Netz, Elastizität des 8.

Netzbezirk bei Ausgleichsberechnungen 181, 184; bei Querschnittsberechnung geschlossener Netze 197.

Netzgleichungen 116; bei Wechselstrom 135; für Querschnittsberechnung 196; Lösung der — nach dem Gausschen Verfahren 116, 121; nach Verhoeckx 123; Vergleich beider Verfahren 133.

Netzkontrolle 130.

Netzspannung, Messung der mittleren 249.

Netzteiling 158.

Netzzumbildung, widerstandstreue 136; Übertragung der Ströme 138, 147; bei Ausgleichsberechnungen 175; Vergleich mit der Spannungsmethode 158.

Normalquerschnitte 6.

Nullleiter siehe Mittelleiter.

Nutzwiderstand 8; bei Parallelschaltung 82; bei Reihenschaltung 8; Stromstärke anstatt — 34.

Offene Leiter 3.

Parallelschaltung 8; bei Leitungsnetzen 31; bei Wechselstrom 63.

Phasenverschiebungswinkel 62, 71, 73, 78.

Primärnetz 194.

Prüfdrähte 249.

Querschnitt der Hin- und Rückleitung 41; des Nullleiters beim Dreileitersystem 229; beim Drehstromsystem 240; beim Zweiphasensystem 242; von Speiseleitungen 217; maximale 220; normale 6; wirtschaftliche 16.

Querschnittsberechnung mittels Modell 1; bei offenen Leitungen 5; bei Reihenschaltung 9; bei Parallelschaltung 38; auf Grund des geringsten Kupfervolumens 38; bei verzweigten Leitern 49; bei Wechselstrom 82; bei geschlossenen Netzen 197; auf Grund konstanten Querschnitts 43; beim gleichförmig belasteten Leiter 46; bei verzweigten Leitern 53; bei Wechselstrom 82; auf Grund konstanter Stromdichte 44; bei verzweigten Leitern 53; bei Wechselstrom 82; langer Leiter 86; beim geschlossenen Leitungsstrang 96; auf Ausgleich 166, 179; bei geschlossenen Netzen 195.

Reaktanz 61, 65, 71; Messung der 75.

Reihenschaltung 8; bei Wechselstrom 63.

Resistanz 61.

Sammelleitungen 218; Einfluss der — auf den Ausgleich 174.

Sekundärnetz 193.

Serienschaltung siehe Reihenschaltung.

Sicherung des Nullleiters 231; von Kabeln 220.

Skineffekt siehe Hauteffekt.

Spannung der Glühlampen 7, 34, 224; gegen Null 4, 35, 60.

Spannungsabfall in Wechselstromkreisen 68, 73, 79.

Spannungsmethode 108, 111; Vergleich der — mit der Strommethode 115; mit der Frick-Kenellyschen 158.

Spannungsschwankungen 7, 220.

Spannungsverlust, Kontrolle des 38; maximaler 220; zulässiger — bei Parallelschaltung 33; beim Dreileiter 228; bei Drehstrom 235, 238, 240; bei Zweiphasenstrom 242; wirtschaftlicher — 16.

Spannungsverteilung bei offenen Leitern 5; bei Reihenschaltung 9; bei Parallelschaltung 35; bei gleichförmig belasteten Leitern 46; bei verzweigten Leitern 49; bei Wechselstrom 78; in langen Leitungen 84. — bei geschlossenen Leitern 93; bei gleichförmig belasteten Leitern 95; bei unvollkommen geschlossenen Leitern 101; in geschlossenen Netzen 107, 109; beim Dreileiter 227; bei Drehstrom 235; bei Zweiphasenstrom 242; siehe ferner Graphische Darstellung.

Speisebereich, wirksamer, bei Querschnittsberechnung geschlossener Netze 198; erreichbarer — bei den verschiedenen Systemen 248.

Speisekästen 220.

Speiseleiter, Bemessung der 161, 217; Teilung der 218; -ströme, abhängig von der Belastung 161.

Speisepunkt 90; günstigste Lage der — 199; günstigste Zahl der 202.

Strom, Zerlegung in Komponenten 81.

Stromdichte, wirtschaftliche 16.

Stromfortleitungskosten 14, 31.

Strommethode 108, 112; Vergleich der — mit der Spannungsmethode 115.

Strommoment 36; bei verzweigten Leitern 53; fiktive Länge der quadratischen 50; der linearen 52.

Stromstärke, fiktive, bei verzweigten Leitern 51, 54.

Stromverteilung bei Reihenschaltung 9; bei Parallelschaltung 34; bei gleichförmiger Belastung 46; bei Wechselstrom 78; in langen Leitern 84; in geschlossenen einfachen Leitern 93; bei gleichförmiger Belastung 95; beim unvollkommen geschlossenen Leiter 100; in geschlossenen Netzen 107; beim Dreileiter 225; Fehler bei Bestimmung der 34.

Superposition s. Überlagerung.

Suszeptanz 61, 70, 73; Messung der 76.

Tabelle I: Belastung für Gleichstromkabel 6.

Tabelle II: Kabelpreise (Werte von a und b) 20.

Tabelle III: Durchschnittliche jährliche Dauer des vollen Betriebes 23.

Tabelle IV: Durchschnittliche jährliche Betriebsdauer elektrischer Lampen verschiedener Verbraucher 35.

Tabelle V: Amortisations- und Instandhaltungsquoten 27.

Tabelle VI: Reduktionsfaktor für den Einfluss des Hauteffektes 64.

Tabelle X: Anschlusszahlen neuerer Centralen bezogen auf 1000 Einwohner 221.

Tabelle XI: Anlagekapital von Centralen 221.

Tabelle XII: Anschlusszahlen für Strassen- und Privatbeleuchtung 222.

Tabelle XIII: Zunahme des Anschlusswertes der Berliner Centralen 222.

Tabelle XIV: Zunahme der Anschlusswerte in grossen Städten 223.

Tabelle XV: Zunahme der Anschlusswerte in kleinen Städten 223.

Überlagerungsprinzip 37; der Ströme in geschlossenen Leitern 95; in geschlossenen Netzen 104.

Übertemperatur, zulässige, bei Kabeln 6; bei Freileitungen 6.

Vektoren, elektrische 59; Zerlegung von 60.

Vergleich der Kupfermengen der verschiedenen Systeme 244; des Speisebereichs 248; s. auch Netzgleichungen, Spannungsmethode.

Verlegung der Stromabnahmen s. Äquipotentiell.

Verteilungskästen 220.

Verzinsung 26.

Verzweigte Leiter 49.

Wechselstrom, Leitungskonstanten 59; Messung der 74.

Wechselstrommotoren, Anlaufstrom 194.

Wechselstromnetze 192.

Wechselstromwiderstand 59, 63, 71; Messung des 75.

Widerstand bei Reihenschaltung 8; bei Parallelschaltung 32; Leitungs- 3; Nutz- 3; spezifischer 5.

Widerstandstreue Netzbildung 136; Vergleich der — mit der Spannungsmethode 158.

Wirkungsgrad der Leitung 11, 17; bei Parallelschaltung 33.

Wirtschaftliche Grössen 15; graphische Ermittlung 29.

Wirtschaftlichkeit von Anlagen 1, 12; bei Reihenschaltung 11; bei Wechselstrom 18; bei Parallelschaltung 38.

Zerstörung des blanken Mittelleiters 232.

Zulässiger Spannungsverlust, siehe Spannungsverlust.

Zweiphasensystem 241; wirtschaftliche Grössen beim 18.

Namenregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

- Anthony, Wirtschaftlichkeit von Anlagen 12.
Ayrton und Perry, Wirtschaftlicher Querschnitt 12.
- Beringer, A., Wirtschaftlicher Querschnitt 12.
Boucherot, Paul, Anlagekosten abhängig von der Betriebsspannung 15.
Breisig, F., Definition der Konstanten des Wechselstromkreises 65, 66.
Bruger, Th., Fehlerkontrolle 232.
Burch, Edward W., Wirtschaftlichkeit von Anlagen 12.
- Cahen, H., Vorteile der Wirtschaftlichkeitsberechnungen 19.
Cohn, Emil, Berechnung der Induktivität 65; der Kapazität 68.
Cohn, Leo W., Kosten von Leitungen 20.
Coltri, Methode zur Ermittlung der Stromverteilung in geschlossenen Netzen 108, 111.
- Dihlmann, C., Ausgleichsrechnungen 164.
Dolivo-Dobrowolsky, M. v., Mehrphasensystem 234.
- Erens, Fr., Fehlerkontrolle 232.
- Feldmann, Benennung der Wechselstromgrößen 61; siehe auch Herzog.
Ferraris, Galileo, Berechnung der Induktivität 65; der Kapazität 68; Darstellung der Strom- und Spannungsverteilung in langen Kabeln 78.
Feussner, W., Die Maxwellsche Maschenmethode 113.
Fischer, L., Mehrphasensysteme 234.
Flemming, J. A., Maxwellsche Maschenmethode 113.
- Franke, A. S., Einführung komplexer Größen 59; Strom- und Spannungsverteilung bei Wechselstromleitern 83.
Freedon, W. v., Gaussssches Näherungsverfahren 117.
Frick, O., Verlegung der Belastungen 102; widerstandstreue Netzbildung 136.
Fröhlich, O., Fehlerkontrolle 232.
- Gauss, Methode zur Auflösung von Gleichungssystemen 114, 116, 121; bei Ausgleichsrechnungen 176.
Gerling, Ch. L., Gaussssches Näherungsverfahren 114.
- Haas, R., Günstigste Zahl der Speisepunkte 202.
- Heaviside, Oliver, Strom- und Spannungsverteilung bei langen Leitungen 84.
Heim, Carl, Preisangaben 21.
Heinke, C., Bezeichnung von Wechselstromgrößen 60.
Helberger, H., Netzmodell zur mechanischen Ermittlung der Strom- und Spannungsverteilung 1.
Helmholtz, Einführung komplexer Größen 59.
- Herzog-Feldmann, Strom- und Spannungsverteilung in langen Kabeln 78, 84; Überlagerung der Stromkomponenten in Wechselstromnetzen 82; widerstandstreue Netzbildung 136, 144, 146; Übertragung der Ströme bei der Sternumwandlung 147; Preisangaben 21; Berechnung der fiktiven Längen bei verzweigten Leitern 50.
Herzog-Stark, Schnittmethode 2, 108, 112; Maxwellsche Maschenmethode 113.
Hochenegg, C., Berechnung geschlossener Netze 1; Wirtschaftlichkeit von Anlagen 13, 16.

- Hopkinson, J., Drellelersystem 225; Erdung des Nullleiters 231.
- Hoppe, Fritz, Preiszusammenstellungen 21; Betriebsdaten 23, 27; statistische Daten 212.
- Hospitalier, Reduktionsfaktor für den Wechselstromwiderstand 64.
- Jürgens, E., Auflösungsverfahren für Gleichungssysteme 115.
- Kallmann, M., Fehlerkontrolle 232.
- Kapp, G., Wirtschaftlichkeit von Anlagen 12.
- Kath, H., Berechnung der Kapazität 66.
- Kelvin, Lord, Reduktionsfaktor für den Wechselstromwiderstand 64.
- Kenelly, A. E., Versuche über Erwärmung von Drähten 6; Strom- und Spannungsverteilung bei Wechselstromleitungen 83; widerstandstreue Netzbildung 136, 144.
- Kilgour, Hamilton, Wirtschaftlichkeit von Anlagen 12.
- Kirchhoff, Gesetze der Stromverteilung 1, 49; bei geschlossenen Netzen 92.
- Lichtenstein, Leo, Berechnung der Induktivität 65; der Kapazität 66; Messung der Wechselstromkonstanten 75.
- Lietke, A., Ausgleichsberechnung 164.
- Maxwell, Stromverteilung in verzweigten Leitern 1; Maschenmethode zur Ermittlung der Stromverteilung in geschlossenen Netzen 113.
- Mehnke, R., Methode zur Auflösung von Gleichungssystemen 114, 121.
- Miller, O. v., Statistische Daten 212.
- und W. H. Lindley, Betriebsdaten 23.
- Müllendorff, E., Querschnittsberechnung bei verzweigten Leitern 52; in geschlossenen Netzen 197; Fehlerkontrolle 232; Teilung von Speiseleitern 208.
- Müller, Hermann, Erdung des Nullleiters 231.
- Norberg-Schulz, Belastungsfaktor 212.
- Ohm, Widerstandsgesetz 1, 4, 31; erweitertes 75.
- Schnetzler, K., Anlagekosten abhängig von der Betriebsspannung 15.
- Seidel, L., Methode zur Auflösung von Gleichungssystemen 114.
- Semenza, G., Graphische Methode bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen 15, 29.
- Sengel, A., Günstigste Zahl der Speisepunkte 202.
- Siemens, W., Berechnungen von Leitungen 1.
- Soschinski, B., Gaussche Näherungsverfahren 114, 121; Ausgleichsberechnungen 164; Fehlerkontrolle 232.
- Steinmetz, C. P., Einführung komplexer Grössen 59.
- Sumec, J. K., Gedächtnisregel für die Umbildung vom Dreieck zum Stern und umgekehrt 145.
- Teichmüller, J., Wirtschaftlichkeit von Anlagen 13; graphische Methode bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen 15; Vorteile der Wirtschaftlichkeitsberechnungen 19; Überlagerungsprinzip 37; Methode zur Ermittlung der Stromverteilung in geschlossenen Netzen 108, 111; Überlagerung der Ströme in geschlossenen Netzen 105; Ausgleichsberechnungen 164; günstigste Zahl der Speisepunkte 202; Drehstromleitungen 234; Elastizität bei Drehstromnetzen 231.
- Thomson, Sir William, Wirtschaftlichkeit von Anlagen 1; Thomsonsche Regel 12.
- Uppenborn, Tafeln für die Beleuchtungsdauer 28.
- Verhoeckx, P. M., Methode zur Auflösung von Gleichungssystemen 115, 123; bei Ausgleichsberechnungen 176; bei Wechselstromnetzen 194.
- Waltenhofen, Wirtschaftlichkeit von Anlagen 12.
- Wikander, E., Wahl der Netzspannung 215.



**THE NEW YORK PUBLIC LIBRARY
REFERENCE DEPARTMENT**

**This book is under no circumstances to be
taken from the Building**

[illegible]

